

## Polymères supramoléculaires et catalyse asymétrique

**Résumé** Dans le but de développer des catalyseurs asymétriques innovants, des sites catalytiques ont été connectés à des polymères supramoléculaires adoptant une configuration hélicoïdale. Les avantages de cette nouvelle classe de catalyseurs sont que leur composition peut être aisément modulée, qu'une quantité minimale de monomères chiraux est utilisée sans diminuer la sélectivité (amplification de chiralité) et que leur sélectivité est contrôlée en temps réel. Toutes ces propriétés, démontrées pour des réactions métallo-catalysées (Rh, Cu), ne sont pas accessibles avec des catalyseurs conventionnels basés sur des liaisons covalentes. L'utilisation de ces catalyseurs supramoléculaires pour la préparation de petites molécules d'intérêt ou de polymères, non accessibles *via* les méthodes catalytiques conventionnelles, est envisageable.

**Mots-clés** Chimie supramoléculaire, catalyse énantiosélective, amplification de chiralité.

**Abstract** **Supramolecular polymers and asymmetric catalysis**

With the aim of developing innovative asymmetric catalysts, catalytic sites have been connected to helical supramolecular polymers. These catalysts feature unique properties: their composition can be easily tuned, a minimal amount of chiral monomers can be used without decreasing the selectivity (chirality amplification), and their selectivity can be controlled in real time. These properties, demonstrated in the realm of metal-catalysed reactions (Rh, Cu), are out of the reach of classical covalent catalysts. The preparation of small molecules of interest or polymers, not accessible with conventional catalytic methods, may be envisaged with these supramolecular catalysts.

**Keywords** Supramolecular chemistry, enantioselective catalysis, chirality amplification.

La catalyse asymétrique a connu des avancées remarquables dans la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle au niveau fondamental (prix Nobel de chimie 2001) permettant son utilisation comme outil de synthèse dans la préparation de molécules énantiopures d'intérêt (notamment des médicaments) [1]. La recherche actuelle se concentre sur l'élaboration de nouveaux catalyseurs moléculaires, de ligands ou d'organocatalyseurs, dans le but d'améliorer l'efficacité des catalyseurs existants ou de développer de nouvelles réactions asymétriques. L'utilisation de catalyseurs bien définis au niveau moléculaire permet une bonne compréhension des étapes clés du cycle catalytique, l'étape déterminant la sélectivité pouvant notamment être sondée à l'aide d'outils analytiques et de modélisation moléculaire. En parallèle, des catalyseurs asymétriques de taille plus importante ont également été étudiés.

Classiquement, des catalyseurs asymétriques ont été supportés sur des polymères, le rôle du support étant de permettre le recyclage du catalyseur [2]. Dans une approche plus récente, des fonctions catalytiques non chirales ont été connectées à des chaînes peptidiques [3], des foldamères [4], des hélices à deux brins [5] ou des polymères hélicoïdaux [6], ou à une biomacromolécule (par exemple l'ADN [7] ou la streptavidine [8]), fournissant l'environnement chiral nécessaire à la réaction asymétrique. Ce rôle « non innocent » du support est réminiscent du mode de fonctionnement des enzymes où les structures secondaires et tertiaires jouent un rôle prépondérant pour la complexation du substrat et sa transformation stéréo- et régiosélective.

### Mise au point de catalyseurs métalliques modulables

Dans le concept que nous souhaitons développer, un polymère supramoléculaire, c'est-à-dire une chaîne de monomères

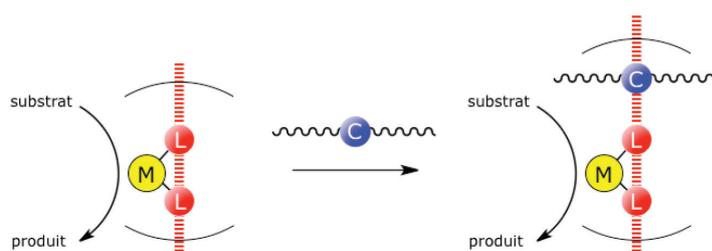


Figure 1 - **Illustration du concept** : le catalyseur est formé en coordonnant un métal (M) aux ligands (L) connectés au polymère supramoléculaire. La composition du polymère supramoléculaire et donc l'environnement du catalyseur sont modulables par simple ajout d'un co-monomère (C).

reliés par des interactions réversibles, est utilisé comme plateforme pour moduler les propriétés d'un catalyseur métallique (figure 1). Contrairement aux supports covalents couramment utilisés, la composition du polymère supramoléculaire peut être variée très simplement. En effet, si un ligand et le co-monomère s'assemblent dans la même structure macromoléculaire, il doit être possible de moduler l'environnement du catalyseur (sphères de coordination) par la nature et la proportion du co-monomère. Cela permet donc, *a priori*, d'optimiser un système catalytique par simple mélange de sites catalytiques et de co-monomères issus d'une bibliothèque, au lieu de synthétiser à chaque fois de nouvelles fonctions catalytiques sur mesure qui doivent intégrer toutes les caractéristiques (électroniques, stériques, stéréochimiques) désirées. Cela permet aussi de changer la sélectivité du catalyseur au cours de la catalyse par addition du co-monomère à un instant donné. Un tel contrôle cinétique peut être intéressant dans le cas de substrats présentant plusieurs fonctions de réactivités différentes ou dans le cas de catalyses de polymérisation. À partir de ce concept, nous pouvons envisager de moduler l'activité et la sélectivité (chimio, régio, stéréo, énantio) du site catalytique en jouant sur la composition et la structure du polymère. Nous présentons ici nos travaux récents sur l'utilisation de

polymères supramoléculaires chiraux comme plateformes pour modifier l'énantiosélectivité de catalyseurs métalliques (rhodium ou cuivre) situés à leur périphérie.

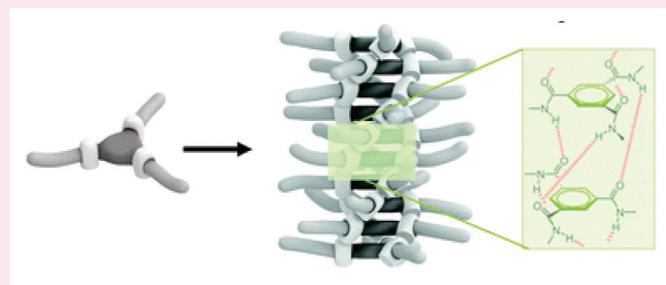
## Les assemblages de BTA : des objets supramoléculaires chiraux

Les monomères benzène-tris-amides (BTA) sont constitués d'un noyau aromatique et de trois fonctions amides et s'auto-assemblent en solution sous la forme de nanohélices bien caractérisées (voir *encadré 1*) [9]. L'arrangement non symétrique des monomères génère un nouvel élément de chiralité (les hélices) : les assemblages de BTA sont donc chiraux à l'échelle supramoléculaire. Il existe différentes approches pour obtenir des hélices de BTA préférentiellement gauches ou droites : utiliser des monomères chiraux uniquement, utiliser un mélange composé d'un monomère achiral (le soldat) et d'un monomère chiral (le sergent), et utiliser un mélange non racémique de deux monomères énantiomères. Dans le premier cas, le transfert de chiralité entre le centre stéréogène présent dans la chaîne latérale et l'arrangement hélicoïdal doit être suffisamment fort pour conduire à la formation d'un seul type d'hélices. C'est le cas de nombreux assemblages à base de monomères BTA [9]. Le succès des deux approches suivantes est dicté par les propriétés d'amplification de chiralité des assemblages de BTA (voir *encadré 2*), c'est-à-dire par la possibilité d'obtenir des assemblages homochiraux avec une faible fraction de sergents (effet « sergents-soldats ») ou avec des monomères de configurations opposées (effet « majorité ») [10]. Les BTA sont faciles à fonctionnaliser, leurs assemblages sont dynamiques et présentent de fortes propriétés de transfert et d'amplification de chiralité ; ils constituent donc une plateforme de choix pour mettre en œuvre le concept proposé.

### Encadré 1

#### Structure supramoléculaire des benzène-tris-amides (BTA)

Les BTA peuvent s'auto-assembler en solution comme à l'état solide sous forme de longs cylindres rigides. Les monomères sont empilés au sein de ces cylindres et sont maintenus par trois liaisons hydrogène entre les groupes amides, qui s'orientent donc hors du plan du noyau aromatique central (angle dièdre d'environ 40°) [9]. Cette géométrie permet également une certaine conjugaison électronique entre les fonctions amide et benzène et une interaction favorable par empilement des noyaux aromatiques. Du fait de l'inclinaison concertée des amides par rapport à l'axe du cylindre, ces objets sont en fait intrinsèquement hélicoïdaux. Si les substituants des fonctions amide sont achiraux, les BTA s'assemblent en un mélange racémique d'hélices gauches et droites. Par contre, si un substituant est chiral, alors l'une des deux hélices est stabilisée et se forme préférentiellement.



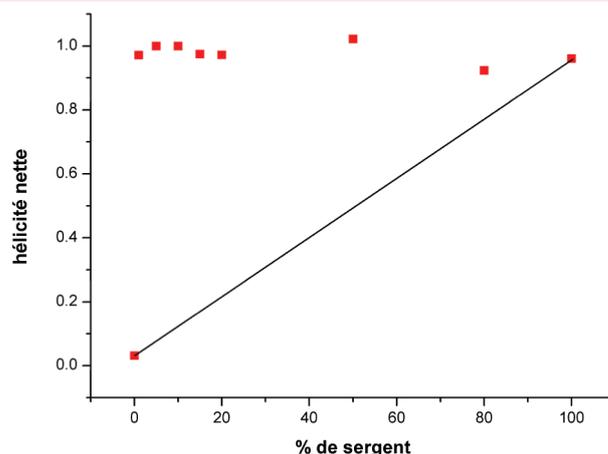
Structure schématique des assemblages hélicoïdaux formés par les BTA (figure issue de [9]).

### Encadré 2

#### Amplification de chiralité dans les assemblages de BTA

Le mélange d'un BTA chiral (nommé « sergent ») et d'un BTA achiral (nommé « soldat ») fournit des co-assemblages hélicoïdaux (voir *encadré 1*). Du fait de la présence du « sergent », les hélices gauches et droites n'ont pas la même stabilité (elles sont diastéréoisomères). Dans certains cas, une faible fraction de « sergents » suffit à imposer un seul type d'hélices et donc la même configuration chirale à tous les « soldats ». Il y a ainsi amplification de la chiralité à l'échelle supramoléculaire : c'est l'effet « sergents-soldats » [10].

De façon analogue, un mélange non racémique de deux BTA énantiomères fournit des co-assemblages hélicoïdaux dont l'hélicité peut être imposée par l'énantiomère en excès : c'est l'effet « majorité » [10].



Effet « sergents-soldats » tel que mesuré par analyse de dichroïsme circulaire. L'hélicité nette correspond à la fraction d'hélices gauches et droites et reflète donc en quelque sorte la pureté optique des assemblages. La ligne noire représente le résultat attendu en l'absence d'effet « sergents-soldats ». Dans le cas représenté ici, moins de 1 % de sergents est suffisant pour obtenir des hélices uniquement gauches.

#### Transfert de chiralité

Nous avons d'abord testé la possibilité de transférer la chiralité de l'édifice supramoléculaire à un catalyseur métallique situé dans sa périphérie. Les ligands BTA préparés dans cette optique contiennent un noyau aromatique BTA central connecté à un groupe 1,3-phénylène-diphénylphosphine (pour la coordination d'un métal « mou ») et une ou deux chaînes latérales chirales (pour le transfert de chiralité). Lorsque BTA<sup>m-PPh<sub>2</sub>(S),(S)</sup> (figure 2) est mélangé à un précurseur de rhodium, un excès énantiomérique (e.e.) de 82 % est observé pour le produit d'hydrogénation de l'itaconate de diméthyle (tableau I) [11]. Cette sélectivité est particulièrement élevée étant donné que l'atome de rhodium et les centres chiraux sont séparés par douze liaisons covalentes. En fait, des expériences de contrôle, comme l'utilisation d'un solvant polaire ou d'un analogue de structure ne pouvant pas s'associer, ont confirmé que la sélectivité observée pour BTA<sup>m-PPh<sub>2</sub>(S),(S)</sup> provient bien de la formation d'auto-assemblages chiraux composés d'unités BTA reliées entre elles par des liaisons hydrogène. Les analyses spectroscopiques et de diffusion de neutrons aux petits angles ont démontré que BTA<sup>m-PPh<sub>2</sub>(S),(S)</sup> forme des hélices longues préférentiellement gauches en solution. La sélectivité peut être augmentée (88 % e.e.) en mélangeant BTA<sup>m-PPh<sub>2</sub>(S),(S)</sup> et un monomère BTA chiral non fonctionnalisé, ce qui montre le caractère facilement modulable de cette nouvelle classe de catalyseurs supramoléculaires.

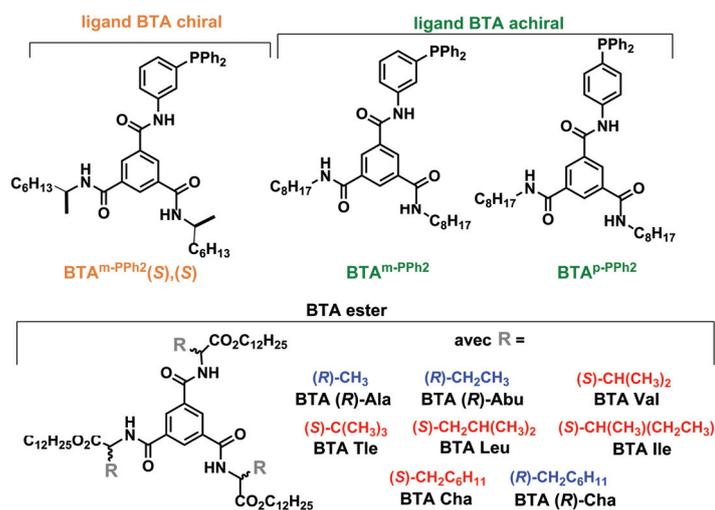
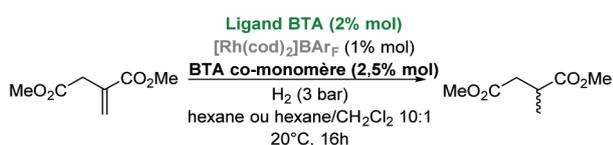


Figure 2 - Sélection de monomères BTA utilisés dans des réactions de catalyse asymétrique.

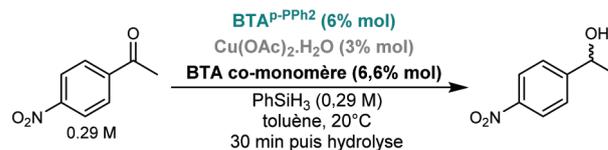
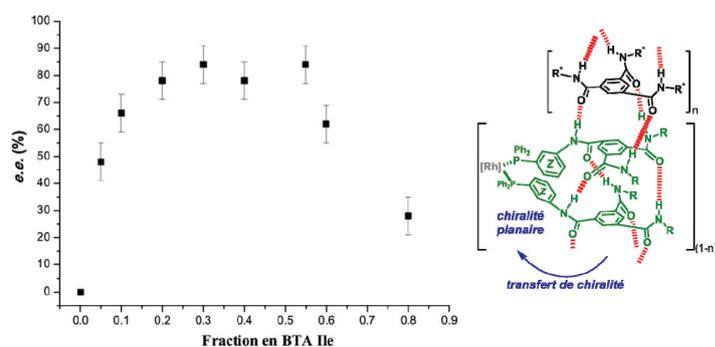


Ligand BTA	Co-monomère	e.e. (%)
BTA <sup>m</sup> -PPh <sub>2</sub> (S) <sub>1</sub> (S)	-	82 (R)
BTA <sup>m</sup> -PPh <sub>2</sub>	BTA (R)-Ala	46 (R)
BTA <sup>m</sup> -PPh <sub>2</sub>	BTA Leu	- 54 (S)
BTA <sup>m</sup> -PPh <sub>2</sub>	BTA (R)-Abu	66 (R)
BTA <sup>m</sup> -PPh <sub>2</sub>	BTA Val	- 85 (S)
BTA <sup>m</sup> -PPh <sub>2</sub>	BTA Ile	- 85 ± 7 (S)

Tableau I - Sélection des résultats obtenus pour l'hydrogénation asymétrique au rhodium de l'itaconate de diméthyle en utilisant des monomères BTA [11-12].

Comme mentionné auparavant, il est aussi possible d'obtenir des hélices homochirales en mélangeant un monomère BTA achiral et un monomère BTA chiral. Néanmoins, la transposition de cette approche à la catalyse est particulièrement risquée étant donné que le moindre ligand achiral non incorporé dans les assemblages va considérablement réduire la sélectivité de la réaction catalytique. Quand un mélange 1,0:1,25 entre le ligand achiral BTA<sup>m</sup>-PPh<sub>2</sub> et un co-monomère chiral est utilisé pour la même réaction d'hydrogénation, le produit est obtenu avec une sélectivité modeste (31 % e.e.). Néanmoins, le transfert de chiralité est fortement influencé par la nature du co-monomère chiral.

Nous avons testé une série de monomères dérivés d' $\alpha$ -amino-esters qui diffèrent seulement par la nature du groupement porté par le carbone stéréogène (BTA ester, figure 2). La nature de ce groupement impacte significativement l'énantio-sélectivité : notre screening a permis d'établir que BTA Val et BTA Ile étaient les deux meilleurs co-monomères pour la réaction d'hydrogénation (85 % e.e., tableau I) [12]. Des mélanges entre un ligand BTA achiral et un co-monomère chiral (ratio 1,0:1,1) ont également été testés en présence de cuivre pour l'hydrosilylation de la 4-nitroacétophène (tableau II) [13]. La sélectivité pour cette réaction varie également fortement suivant la nature du BTA utilisé. Ici, le ligand isomère de BTA<sup>m</sup>-PPh<sub>2</sub> avec le groupement diphenylphosphine en position *para* par rapport à la fonction amide, BTA<sup>p</sup>-PPh<sub>2</sub>, permet d'obtenir des sélectivités plus élevées. Les co-monomères avec une chaîne branchée portée par le carbone stéréogène, BTA Leu, BTA Ile et BTA Cha, donnent



Co-monomère	e.e. (%)
BTA Tle	47 (R)
BTA Val	48 (R)
BTA Leu	53 (R)
BTA Ile	53 (R)
BTA Cha	54 (R)
BTA (R)-Cha	- 54 ± 1 (S)

Tableau II - Sélection des résultats obtenus pour l'hydrosilylation asymétrique au cuivre de la 4-nitroacétophène en utilisant des monomères BTA [13].

les meilleurs résultats (53-54 % e.e., tableau II). Ces résultats démontrent que les complexes métalliques (Rh, Cu) situés dans l'environnement chiral des co-assemblages de BTA sont capables de catalyser des réactions avec une sélectivité significative.

### Amplification de chiralité

En vue d'exploiter l'effet « sergents-soldats » en catalyse, nous avons sélectionné le couple de monomères BTA qui donnait la meilleure sélectivité dans la réaction d'hydrogénation, BTA<sup>m</sup>-PPh<sub>2</sub> et BTA Ile, et avons fait varier la quantité de sergents dans le mélange (0,05-80 %). L'énantio-sélectivité ne varie pas de façon linéaire en fonction de la quantité de sergents présents dans le mélange (figure 3) [12]. En fait, une sélectivité optimale est obtenue pour un mélange contenant seulement 20 % de sergents, c'est-à-dire un co-monomère transfère sa chiralité à quatre ligands (ou deux atomes de Rh). Le co-assemblage entre le ligand coordonné au rhodium et le co-monomère est insoluble dans les conditions de la catalyse mais a néanmoins pu être caractérisé par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (IR-TF) et par dichroïsme circulaire (DC). Ces techniques ont confirmé la formation de co-assemblages homochiraux, c'est-à-dire la formation d'hélices droites uniquement, pour les mélanges contenant au moins 20 % de sergents. Ceci constitue le premier exemple de catalyseur asymétrique pour lequel une quantité sous-stœchiométrique d'inducteur chiral, relativement à un ligand achiral,

peut être utilisée sans diminuer la stéréosélectivité de la réaction catalytique. La sélectivité est corrélée au sens de rotation, à l'hélicité (c'est-à-dire au ratio de fragments hélicoïdaux droits et gauches) et au mode de coordination des motifs PPh<sub>2</sub> à l'atome de rhodium catalytique (cf. remarque dans la légende de la figure 3). Cette rationalisation de la sélectivité de la réaction catalytique en fonction de la composition et de la structure des assemblages facilite la sélection de combinaisons de monomères plus efficaces par simple mesure de leurs propriétés chiroptiques par spectroscopie DC.

## Commutation de la chiralité

Les expériences précédentes ne mettent pas en lumière le caractère dynamique du catalyseur, c'est-à-dire la possibilité de modifier sa composition (et donc sa sélectivité) au cours de la réaction catalytique. Profitant de la solubilité du catalyseur de cuivre, nous avons recherché des conditions permettant d'inverser son énantiosélectivité durant la réaction d'hydrosilylation de cétones prochirales. Nous avons utilisé pour cela l'effet « majorité » (encadré 2) qui est particulièrement fort pour le mélange de BTA conduisant à la meilleure sélectivité (BTA<sup>p</sup>-PPh<sub>2</sub> et BTA Cha, tableau II). En effet, lorsque le ligand est mis en présence d'un mélange contenant un excès de BTA (R)-Cha (BTA (R)-Cha: BTA Cha = 2), des hélices majoritairement gauches sont formées, ce qui conduit à l'obtention du produit d'hydrosilylation avec une sélectivité optimale [13]. Le même rapport en BTA mais avec BTA Cha comme monomère majoritaire fournit le produit avec la même sélectivité mais une configuration opposée. Nous avons donc testé la possibilité d'inverser le sens de rotation des hélices de BTA (et donc l'énantiosélectivité du catalyseur) au cours de la réaction par simple addition du co-monomère de BTA initialement en défaut.

Le succès de l'approche dépend de plusieurs paramètres : le catalyseur doit rester stable, et l'inversion de sélectivité doit être rapide et complète. Le temps nécessaire à l'inversion de chiralité est obtenu en mesurant la sélectivité pour des expériences conduites avec différents intervalles de temps entre l'addition du co-monomère (qui déclenche l'inversion) et l'addition du phénylsilane (qui déclenche la réaction). Cinq secondes environ suffisent pour inverser l'énantiosélectivité de la réaction. L'addition de BTA (R)-Cha peut être réalisée pendant la conversion de la 1-(4-biphényl)éthanone : les 10 % convertis avant l'inversion donnent le produit énantio-enrichi de configuration (R) (40 % e.e.) alors que les 35 % convertis après l'inversion donnent le produit de configuration (S) (45 % e.e.) [13]. Les produits sont obtenus avec des sélectivités optimales et opposées, ce qui démontre que l'inversion de chiralité est rapide et totale.

L'intérêt synthétique d'un tel concept implique l'inversion de chiralité lors de la transformation d'un substrat possédant plusieurs fonctions de réactivités différentes. Les cétones prochirales utilisées ne contiennent évidemment qu'une seule fonction réactive mais montrent des réactivités nettement différentes vis-à-vis du catalyseur de cuivre supramoléculaire. Nous avons donc pu réaliser l'inversion de sélectivité pendant la transformation d'un mélange équimolaire de deux substrats présents dès le début. La 4-nitroacétophénone est d'abord hydrosilylée avec le catalyseur initial donnant préférentiellement le produit de configuration (R) (ou (S)), puis la 1-(4-biphényl)éthanone est majoritairement hydrosilylée après l'inversion de sélectivité, ce qui fournit le produit de

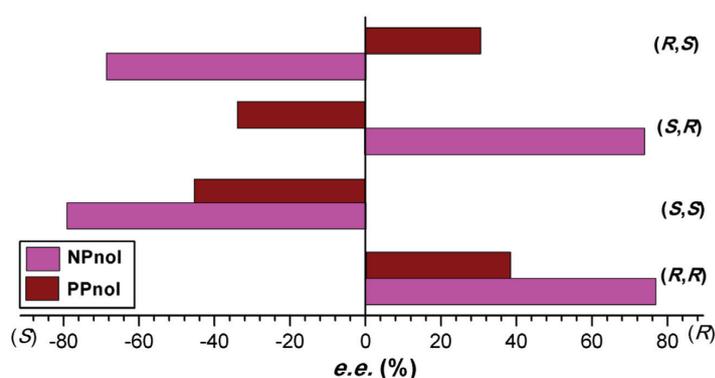


Figure 4 - Obtention de toutes les combinaisons possibles des produits d'hydrosilylation (R,R), (S,S), (S,R) et (R,S). L'inversion de sélectivité lors de l'hydrosilylation catalysée au cuivre d'un mélange 1:1 de substrats est obtenue en rajoutant 20 % mol de BTA Cha (ou BTA (R)-Cha) durant la réaction. NPnol : 1-(4-nitrophényl)éthanol et PPnol : 1-(4-biphényl)éthanol.

configuration (S) (ou (R)). Avec quatre expériences (deux avec inversion et deux sans inversion) et en changeant la composition initiale, toutes les combinaisons possibles des deux produits d'hydrosilylation sont obtenues ((R) et (R), (S) et (S), (R) et (S), et (S) et (R)). Grâce au fort effet « majorité » présent dans ces co-assemblages de BTA, les sélectivités obtenues sont proches des sélectivités optimales dans tous les cas (figure 4) [13].

## Vers des catalyseurs énantiosélectifs encore plus performants

En positionnant des sites catalytiques en périphérie de polymères supramoléculaires, nous avons développé une classe de catalyseurs asymétriques modulables possédant des propriétés inaccessibles avec les catalyseurs classiques basés sur des squelettes moléculaires covalents. Ainsi, la quantité de monomère énantio-pur utilisée pour induire la chiralité au co-assemblage peut être inférieure à la charge catalytique (usuellement calculée par rapport au métal). Aucune autre méthode existante en catalyse asymétrique ne permet d'utiliser un inducteur chiral en quantité subcatalytique. L'énantiosélectivité du catalyseur peut aussi être inversée rapidement et complètement durant la réaction chimique. Le catalyseur supramoléculaire permet donc de sélectionner le produit souhaité là où un catalyseur classique donnera accès à un seul produit.

Ce résultat est particulièrement important en considérant que lors de la préparation d'une molécule chirale d'intérêt pharmaceutique, la synthèse de tous les stéréoisomères est requise. La synthèse de ces stéréoisomères peut être grandement simplifiée en utilisant un catalyseur dynamique tel que celui mentionné dans le présent article.

Ces travaux se poursuivent actuellement au laboratoire en vue de réduire encore la quantité d'espèces chirales nécessaires. Le concept sera également étendu à l'obtention de petites molécules d'intérêt ou de polymères ne pouvant pas être obtenus avec les approches catalytiques traditionnelles.

[1] Noyori R., *Asymmetric catalysis: science and opportunities (Nobel Lecture)*, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2002**, *41*, p. 2008.

[2] Trindade A.F., Gois P.M.P., Afonso C.A.M., *Recyclable stereoselective catalysts*, *Chem. Rev.*, **2009**, *109*, p. 418.

[3] Berkessel A., Gasch N., Glaubitz K., Koch C., *Highly enantioselective enone epoxidation catalyzed by short solid phase-bound peptides: dominant role of peptide helicity*, *Org. Lett.*, **2001**, *3*, p. 3839.

[4] Maayan G., Ward M.D., Kirshenbaum K., Folded biomimetic oligomers for enantioselective catalysis, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **2009**, 106, p. 13679.

[5] Hasegawa T., Furusho Y., Katagiri H., Yashima E., Enantioselective synthesis of complementary double-helical molecules that catalyze asymmetric reactions, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2007**, 46, p. 5885.

[6] Suginome M., Yamamoto T., Nagata Y., Yamada T., Akai Y., Catalytic asymmetric synthesis using chirality-switchable helical polymer as a chiral ligand, *Pure Appl. Chem.*, **2012**, 84, p. 1759.

[7] Arseniyadis S., Duchemin N., Heath-Apostolopoulos I., Smietana M., Catalyse asymétrique innovante à base d'ADN, *L'Act. Chim.*, **2017**, 417, p. 17.

[8] Ward T.R., Artificial metalloenzymes based on the biotin-avidin technology: enantioselective catalysis and beyond, *Acc. Chem. Res.*, **2011**, 44, p. 47.

[9] Cantekin S., de Greef T.F.A., Palmans A.R.A., Benzene-1,3,5-tricarboxamide: a versatile ordering moiety for supramolecular chemistry, *Chem. Soc. Rev.*, **2012**, 41, p. 6125.

[10] Palmans A.R.A., Meijer E.W., Amplification of chirality in dynamic supramolecular aggregates, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2007**, 46, p. 8948.

[11] Raynal M., Portier F., van Leeuwen P.W.N.M., Bouteiller L., Tunable asymmetric catalysis through ligand stacking in chiral rigid rods, *J. Am. Chem. Soc.*, **2013**, 135, p. 17687.

[12] Desmarchelier A., Caumes X., Raynal M., Vidal-Ferran A., van Leeuwen P.W.N.M., Bouteiller L., Correlation between the selectivity and the structure of an asymmetric catalyst built on a chirally amplified supramolecular helical scaffold, *J. Am. Chem. Soc.*, **2016**, 138, p. 4908.

[13] Zimbron J.M., Caumes X., Li Y., Thomas C.M., Raynal M., Bouteiller L., Real-time control of the enantioselectivity of a supramolecular catalyst allows selecting the configuration of consecutively formed stereogenic centres, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2017**, 56, p. 14016.

[14] Desmarchelier A., Raynal M., Brocorens P., Vanthuyne N., Bouteiller L., Revisiting the assembly of amino ester-based benzene-1,3,5-tricarboxamides: chiral rods in solution, *Chem. Commun.*, **2015**, 51, p. 7397.

**Matthieu RAYNAL** est chargé de recherche au CNRS et **Laurent BOUTEILLER** est directeur de recherche au CNRS à l'Institut Parisien de Chimie Moléculaire, Sorbonne Université, Équipe Chimie des Polymères.

\*matthieu.raynal@upmc.fr ; laurent.bouteiller@upmc.fr



## Solvants "verts" et alternatifs

CARLO ERBA Reagents vous propose une gamme d'alternatives plus vertes à quelques solvants classiques :



- 2-Méthyltétrahydrofurane (2-MeTHF) : un solvant biosourcé alternatif au THF et dichlorométhane
- 4-Méthyltétrahydropyrane (MTHP) : une alternative innovante et moins toxique au THF
- Cyclopentylméthyléther (CPME) : un solvant polyvalent substitué du MTBE, Dioxane, THF,...
- n,n'-Diméthylpropylèneurée (DMPU) : une alternative "verte" aux solvants dipolaires aprotiques
- 1,3-Propanediol : un solvant biodégradable performant issu de ressources renouvelables
- 1,3-Dioxolane : un solvant inodore, non toxique et respectueux de l'environnement

Plus d'informations?  
Téléchargez notre plaquette sur :

[www.carloerbareagents.com](http://www.carloerbareagents.com)   