

1 DE L'ORIGINE DE LA CHIRALITE

1.1 Introduction

Un des phénomènes majeurs de la nature, certes beaucoup moins connu du grand public que ne peut l'être la radioactivité et les importantes découvertes civiles ou militaires liées à l'atome, ou plus récemment les évolutions médicales sous-tendues par le décryptage du génome humain : telle se présente modestement la chiralité, et pourtant...

Pour ceux et celles qui ont la possibilité de côtoyer journellement cet évènement au laboratoire, il est rigoureusement impossible de négliger les implications essentielles qu'il porte en son sein, que ce soit lorsqu'on profite des qualités d'un édulcorant artificiel, des vertus d'une médication, ou plus fondamentalement encore lorsque l'homochiralité de molécules essentielles se marque probablement comme un des aspects fondamentaux de l'émergence de la vie sur Terre. Les enzymes, responsables de réactions catalysées dans les organismes vivants et les innombrables molécules chirales participant aux processus de reconnaissance et de relais d'information, telles les hormones, ne se seraient pas présentées sous cette forme sans une chiralité uniforme de leurs entités monomériques constitutives, ni plus d'ailleurs sous les formes courantes de vie que nous connaissons et dont nous faisons partie intégrante.

L'origine de la chiralité dans les biomolécules reste à ce jour expliquée par de prudentes hypothèses¹ et références citées. L'homochiralité se traduit donc au niveau moléculaire par un large excès d'acides aminés L et de sucres D par rapport à leurs énantiomères. Plusieurs théories dignes d'intérêt ont été proposées afin d'expliquer la chiralité biomoléculaire, basées sur des expériences dont une des difficultés fut souvent de pouvoir tirer des conclusions à partir de l'échelle du temps du laboratoire, bien congrue eu égard à celle de l'Univers ! Il nous semble intéressant de débiter cette thèse, elle-même arc-boutée sur la chiralité, par une présentation des efforts réalisés dans la recherche de ses origines probables.

Déjà il y a plus d'un siècle et demi, Louis Pasteur réalisait sa très fameuse expérience concernant la résolution de l'acide tartrique ; à l'écoute ensuite des découvertes de Faraday, il s'essaya vainement à promouvoir la croissance de cristaux chiraux soumis à un champ magnétique. Emil Fischer montra lui qu'une « force dissymétrique » n'était pas requise pour générer des molécules optiquement actives. Le principe d'une molécule optiquement active capable de contrôler une réaction subséquente était né. Cependant trois questions restaient en suspens :

- 1- Quelle est l'origine de la chiralité biomoléculaire ?
- 2- Pourquoi le biais chiral est-il en faveur des acides aminés L et des sucres D ?
- 3- Comment l'amplification d'un ee initial apparemment faible a-t-elle pu survenir ?

1.2 La chiralité dans la nature

1.2.1 Origine terrestre

On pensa longtemps que la nature était symétrique au niveau atomique ; l'homochiralité biochimique résultait sans doute d'une brisure de symétrie, spontanée, et la préférence énantiomérique observée pour les acides aminés et les sucres ne se devait qu'au hasard. Cette idée tint jusqu'en 1957 bien qu'il existât déjà une alternative fournie par Le Bel et van't Hoff, celle-ci consistait en une photosynthèse asymétrique sous irradiation par de la lumière polarisée circulaire (CPL). Les scientifiques s'interrogèrent aussi sur l'étape qui vit s'ériger l'asymétrie en facteur décisif. Les formes de vie primitives s'étaient-elles d'abord développées en usant, en même temps, de monomères D et L, et l'homochiralité avait elle généré un avantage distinct au cours d'un stade ultérieur d'évolution ? Ou l'homochiralité était-elle une conséquence d'une évolution chimique ainsi qu'une condition nécessaire à l'évolution de la vie, cette fois ?

Il a été montré que l'origine biogénique de l'homochiralité était peu probable. Par une expérience, Eschenmoser *et al.* prouvèrent que les oligomères possédant la même chiralité se liaient exclusivement, menant à

une oligomérisation stéréosélective². Cette découverte indique que la génération « forcée » d'entités homochirales est bien possible.

En outre, la génération spontanée d'activité optique, sans biais chiral préalable, a été observée ; preuve expérimentale manifeste de la possibilité d'obtenir des molécules organiques chirales ! Ceci le fut dans le cadre d'une cristallisation préférentielle d'un mélange racémique dynamique d'énantiomères. Bien que ce type de cristallisation préférentielle soit normalement défavorisé du point de vue entropique, le phénomène est rendu possible par le gain enthalpique que génère le passage d'un système homogène à un système hétérogène. Le schéma 1 précise deux exemples observés, l'un impliquant un sel d'ammonium, l'autre un binaphtalène. Pour ce dernier, la production de binaphtalène énantiomériquement enrichi s'opère par un refroidissement rapide d'une petite partie de la solution, solution au sein de laquelle la racémisation est rapide.

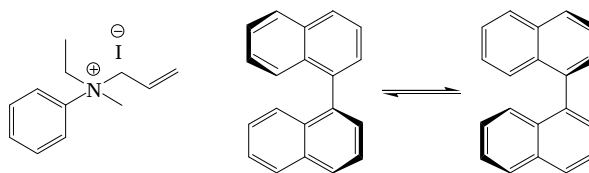


schéma 1

Dans tous les cas, il est important de noter que la sélection chirale que l'on constate envers l'un des deux énantiomères n'est que le résultat du hasard.

De manière intéressante, on notera aussi l'existence de réactions photochimiques opérant sur un composé achiral, mais solide sous forme de cristal chiral, et induisant un produit optiquement enrichi. On doit à Toda *et al.* d'en avoir rapporté un exemple remarquable : la photocyclisation d'une amide diisopropylique présentée dans le schéma 2 ci-dessous.

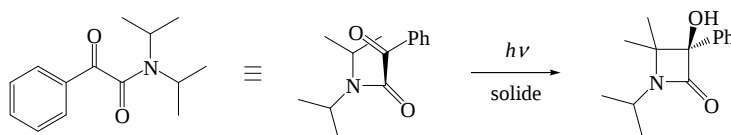


schéma 2

La conformation hélicoïdale présente dans le solide chiral est une conséquence de la torsion du lien CO-CO. Cette conformation, bloquée lors de la photocyclisation, génère alors une β -lactame de 93% ee.

Objectons que cette méthode n'a pu devenir une méthode générale de synthèse asymétrique absolue en raison de la non-prédictibilité de la cristallisation du substrat achiral. Ce problème peut toutefois être contourné par un ensemencement de la solution.

1.2.2 Origine extraterrestre

Depuis quelques temps aussi, l'idée que la Terre aurait pu être contaminée par un dépôt de matériel non racémique d'origine extraterrestre gagne en crédit. Ce dépôt pourrait être à l'origine de l'homochiralité observée. A cet égard, l'isolement d'alanine (proportion de ^{15}N caractéristique d'une origine extraterrestre et excès de L-alanine significatif) prélevée sur la météorite Murchinson qui frappa le sol australien en 1969 apparaît comme un fait majeur. Combinons cela avec la découverte de sources intenses de radiation circulaire polarisée dans le cosmos, et nous comprenons que la photolyse asymétrique de matériel organique dans les nuages interstellaires est tout à fait envisageable, ce qui a pu susciter la production d'énormes quantités de molécules optiquement actives. La question de la préférence orientée vers un type d'énantiomère subsiste toutefois.

1.3 La force faible

1.3.1 Violation de parité

En 1957, Lee et Yang mirent au jour la « violation de parité » au sein de la force nucléaire faible, en d'autres mots l'existence d'une probabilité différente pour que survienne un phénomène ou son image miroir. Cette

découverte conduisit à observer expérimentalement que des particules β provenant de radionucléides possédaient intrinsèquement de l'asymétrie : les électrons L sont préférentiellement émis en regard des électrons de type R ! La conséquence majeure en est évidemment que la chiralité existe au niveau des particules élémentaires. Jusqu'à la fin des années 1960, on supposait que cette violation de parité n'excédait pas le champ des réactions nucléaires. Une théorie à ce moment indiqua qu'il existait une force électrofaible, la force Z, entre électrons d'une part et les protons et neutrons d'autre part, qui ne conservait pas la parité. Pour cette force Z, les électrons L et R sont dotés de charges opposées ; cette différence de signes provoque l'attraction entre le noyau et l'électron R tandis que les électrons L sont repoussés.

Deux conséquences importantes découlent de cette force Z : premièrement, cela signifie que tous les atomes sont chiraux ; deuxièmement, qu'une molécule chirale existe à deux niveaux d'énergie relatifs aux énantiomères.

1.3.2 Chiralité fondamentale et énantiosélectivité

Comment la chiralité fondamentale pourrait-elle avoir généré l'énantiosélectivité, et par là même expliquer peut-être l'homochiralité ?

Premièrement, l'excès d'électrons L émis par désintégration β génère une radiation électromagnétique de type L également, ce qui pourrait engendrer la décomposition préférentielle d'un des stéréoisomères du racémate, laissant son énantiomère en excès. En second, considérons aussi les particules β capables de décomposer différemment les molécules chirales. Tant calculs qu'expériences démontrent toutefois que l'excès énantiomérique obtenu est alors de l'ordre de 10^{-9} . Une troisième possibilité serait que la force Z affecte directement la production d'acides aminés D ou L en stabilisant plus spécialement l'un des énantiomères. Les calculs ici donnent à cette violation de parité une influence de 10^{-16} J.mol⁻¹ pour l'analogue stéroïdique (3) du schéma 3, 10^{-13} J.mol⁻¹ pour de l'éthylène « twisted » à 10° (4). En outre, à une valeur de 10^{-14} J.mol⁻¹ correspond une conformation spécifique de l'alanine (5) dans l'eau, avec l'énantiomère L, d'abondance naturelle supérieure, possédant l'énergie la plus faible.

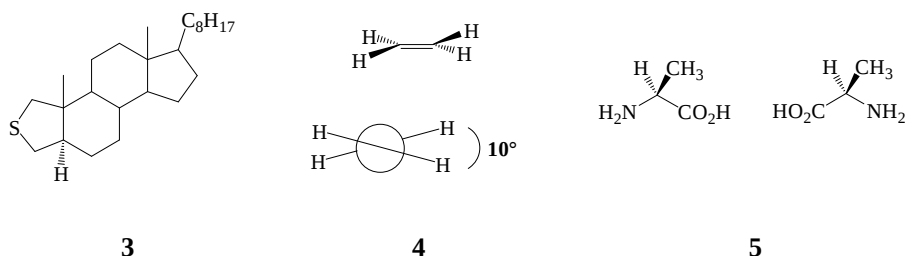


schéma 3

Dans le cas de l'alanine, un excès énantiomérique très faible de 10^{-17} est attendu. Cette déviation, certes plus faible que la déviation aléatoire d'un mélange racémique, démontre toutefois que la force Z induit clairement un biais favorable à l'acide aminé L.

On réalisa quelques essais visant à produire des composés énantiomériquement enrichis en usant de la chiralité fondamentale de la dégradation β , sans succès. Toutefois, ces résultats purent s'expliquer par la faible polarisation résultant de hautes longueurs d'onde, le degré de polarisation circulaire de la dégradation β diminuant en effet proportionnellement à l'augmentation de celles-ci. Des expériences complémentaires mettant en œuvre des électrons longitudinalement polarisés, produits par un accélérateur linéaire, dévoilèrent une dégradation préférentielle de l'isomère D de la leucine, initialement racémique. La discrimination chirale alors observée fut de 1,4%. Ici encore, un mécanisme associé d'amplification s'avère nécessaire afin de pouvoir créditer la dégradation β d'une certaine influence envers l'homochiralité.

1.4 Forces physiques

Depuis le milieu du vingtième siècle, plusieurs tentatives combinant le champ magnétique terrestre avec des rotations orientées de réacteurs, ou le mettant en présence d'un champ électrique furent menées avec pour but encore une fois d'obtenir un certain excès énantiomérique. Malheureusement, que ce soit le fait d'un manque navrant de reproductibilité, d'un refus ultérieur de la méthode soumise à de nouveaux arguments théoriques, voire même de malhonnêteté scientifique³, aucun résultat probant ne put être extrait de ces expériences.

Il semble que le problème majeur est d'identifier la chiralité d'une force physique ; certains systèmes furent en effet considérés erronément dissymétriques. Les physiciens prennent soin de parler de « vraie » et de « fausse » chiralité en fonction de la relation au temps qu'ont certains phénomènes, bien que la fausse chiralité puisse théoriquement promouvoir la synthèse asymétrique pour des réactions qui se dérouleraient « loin » de l'équilibre thermodynamique^{4, 5}. La discussion plus avant de ces points sera laissée à leurs bons soins, d'autant qu'aucune preuve expérimentale n'a à ce jour pu être apportée.

1.5 Synthèse asymétrique et lumière circulaire polarisée

La lumière circulaire polarisée (LCP) constitue sans l'ombre d'un doute une radiation électromagnétique véritablement chirale, ce qui lui permet logiquement d'intervenir dans une synthèse et de provoquer un biais chirale ; la condition requise étant que les molécules susceptibles de subir une réaction absorbent un rayonnement dans le domaine UV-visible.

Par l'interaction LCP-matière, une molécule prochirale atteindra un état excité comportant une certaine chiralité, ce qui peut mener à la formation préférentielle d'un énantiomère. On distingue trois types de conversions énantiosélectives influencées par la lumière circulaire polarisée (figure 1) :

A - La photodestruction préférentielle, dans laquelle un des énantiomères du racémate subit une conversion préférentielle ; l'excès énantiomérique se trouve enrichi de l'autre énantiomère. Le processus est irréversible.

B - La photorésolution, processus de déracémisation entre énantiomères convertibles entre eux.

C - La photosynthèse asymétrique, soit la formation d'un composé optiquement actif par réaction photochimique énantiosélective à partir de matériel prochiral.

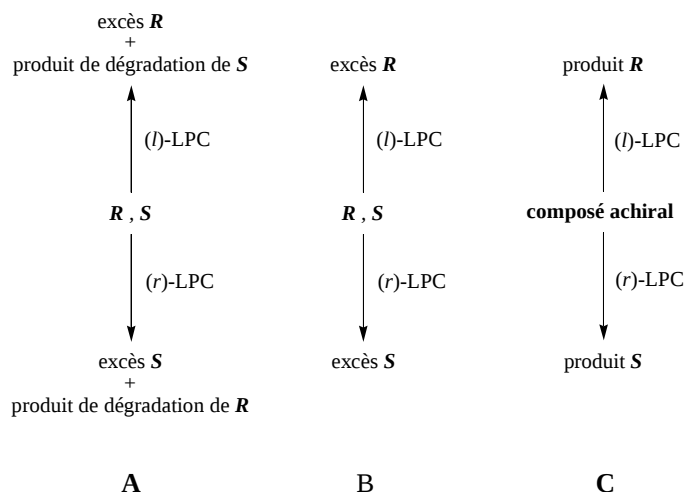


figure 1

En ce qui concerne l'origine de l'homochiralité, précisons d'emblée qu'une très mince part de la lumière arrivant sur Terre est circulairement polarisée, probablement à cause du phénomène de dispersion causé par les particules dans l'atmosphère. Ceci impose presque nécessairement qu'un rayonnement localement intense de LCP ait été créé, suivi d'un mécanisme d'amplification, de grande ampleur lui aussi.

1.5.1 Photodestruction

Kuhn *et al.* accomplirent la première photolyse asymétrique, assurant une photodestruction énantiosélective du mélange racémique de la diméthylamide de l'acide α -azidopropionique⁶.

Plus tard, l'équipe de Kagan rapporta des puretés optiques de 20% pour le camphre et de 30% pour la trans-bicyclo[4.3.0]nonan-3-one, lorsque 99% du racémate avait été photodétruit⁷. Bien que ces résultats comptent parmi les stéréosélectivités les plus élevées obtenues, le rendement très faible en composé optiquement actif résiduel illustre le désavantage associé à cette méthode de résolution cinétique.

Notons encore que Bonner⁸ obtint de la leucine énantiomériquement enrichie (2% ee, après irradiation LCP) et que cette voie d'enrichissement se

révèle importante à considérer lorsqu'on se penche sur l'origine de l'homochiralité biomoléculaire.

1.5.2 Photodéracémisation

Le premier exemple de photodéracémisation fut proposé par Schuster⁹, à savoir la formation réversible d'un excès en un énantiomère par irradiation d'un racémate par de la lumière circulaire polarisée. Cet exemple est présenté dans le schéma 4 et l'excès énantiomérique observé était de 0,4%.

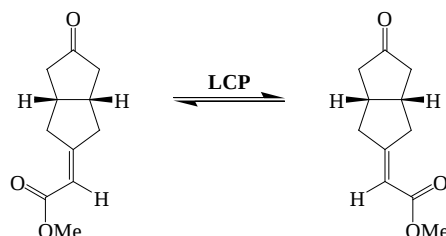


schéma 4

1.5.3 Photosynthèse asymétrique

Les équipes de Kagan¹⁰ et Calvin¹¹ exposèrent indépendamment la synthèse énantiosélective d'hélicènes, induite par la LCP (schéma 5). Lorsque le benzophénantrène (6) ou le naphtyl-phénantryl-éthylène (7) sont irradiés par de la LCP de longueur d'onde comprise entre 310 et 410 nm, ils produisent en passant par un intermédiaire dihydrohélicène, l'hélicène (8).

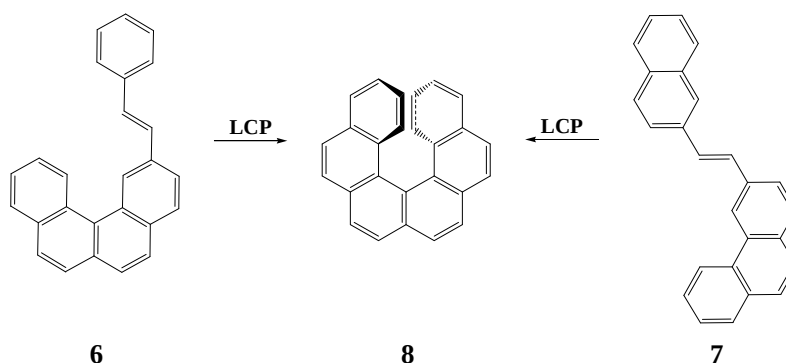


schéma 5

La réaction photochimique s'opère sur l'état singulet excité le plus bas en énergie de l'alcène cis. La lumière circulaire polarisée agira comme promotrice du passage de la molécule à son état fondamental vers un état excité d'orientation hélicoïdale préférentielle, générant par là une certaine déviation optique au sein du produit final.

1.6 Amplification de la chiralité

1.6.1 Autocatalyse

Hormis l'exception de synthèse asymétrique au sein de cristaux énantiomorphes et quelques cas de réactions associées à la lumière circulaire polarisée, les excès énantiomériques observés dans pareilles synthèses asymétriques sont extrêmement faibles. Force est de constater la participation absolument nécessaire d'un mécanisme d'amplification pour renforcer le biais chiral initial.

Un système autocatalytique peut se représenter simplement comme suit (figure 2) au moyen de ces équations :

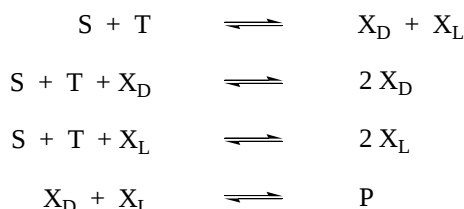


figure 2

Deux composés achiraux réagissent (S et T), menant à deux produits énantiomériques (X_D et X_L), chacun catalysant par la suite sa propre formation. Si chaque énantiomère joue le rôle d'inhibiteur pour l'autre, le système est dit métastable. En d'autres termes, la moindre perturbation peut alors conduire à une forte amplification. Il a été calculé que pour un tel système, un biais d'ordre de grandeur semblable à celui présenté par la violation de parité de la force nucléaire faible pourrait créer, sur une période de 50000 à 100000 ans, une situation dans laquelle 98% des molécules seraient gauches, comme cela est observé pour les acides aminés terrestres.

Le cas particulier de l'autoréplication procède d'une molécule agissant comme une empreinte liant les composés par des interactions non-covalentes et les orientant de telle sorte qu'ils puissent réagir et former une copie de l'originale. Orgel démontra que ceci se produisait lors de la synthèse d'oligonucléotides¹² ; un autre modèle peut, par opposition, être présenté comme usant d'autoréplicateur « artificiel » (schéma 6).

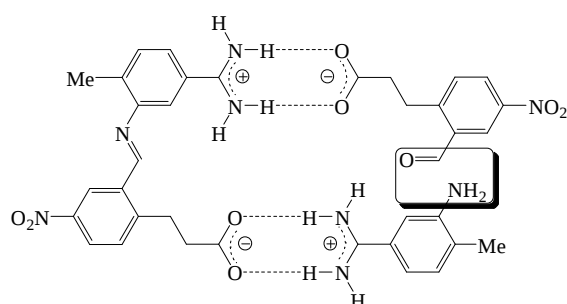


schéma 6

En 1990 Soai *et al.* s'aperçurent que l'alcool pyridinique optiquement actif, obtenu par addition de diisopropylzinc sur la pyridine-3-carbaldéhyde, catalysait sa propre formation¹³, ainsi que le montre le schéma 7.

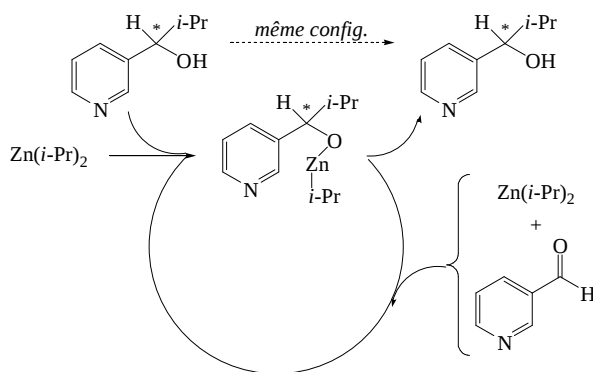


schéma 7

Jusque là, les systèmes étudiés ne permettaient que la synthèse de produit caractérisé par un ee plus faible que l'inducteur de chiralité. L'équipe de Soai, à nouveau, permit une avancée majeure dans ce domaine

en découvrant un système fort semblable mais cette fois d'automultiplication asymétrique catalytique¹⁴ (schéma 8) .

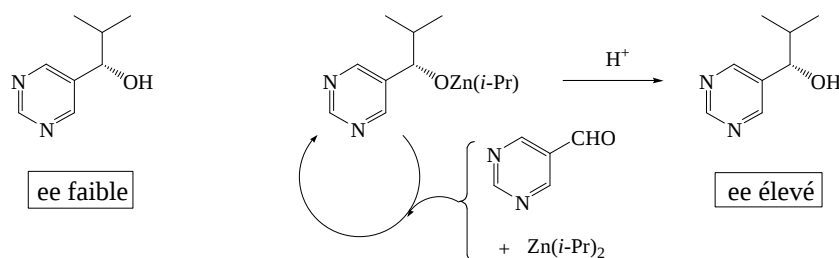


schéma 8

L'addition de dialkylzinc sur un aldéhyde pyrimidique se déroule cette fois sans perte de pureté optique ; au contraire l'ee obtenu est bien plus élevé. Au départ d'un alcool pyrimidique de 5% ee (S) ajouté à raison de 20 mol%, il est possible d'obtenir l'alcool possédant maintenant 39 % ee, en un cycle réactionnel (toluène, - 20 °C, 20 min). En réinjectant le produit obtenu dans un second cycle, respectant les mêmes conditions, l'excès est alors de 76%. Un troisième cycle permet d'atteindre 85%.

Parmi les substrats testés, le 2-(*tert*-butylphényl)-pyrimidine-5-carbaldéhyde (**12**) conduisit aux meilleurs résultats à ce jour (schéma 9).

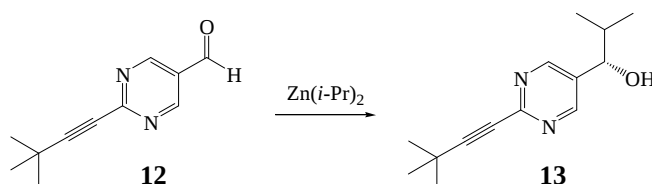


schéma 9

En plaçant ce dernier en présence de diisopropylzinc à 0 °C dans le toluène ou le cumène, l'alcool secondaire **13** correspondant s'obtenait sous forme non racémique (15 à 91 %), sans ajout préalable d'une quelconque source de chiralité. Au cours d'une série de tests, il fut toutefois noté que le sens de l'ee se distribuait aléatoirement. Ce fait expérimental étrange à première vue s'explique par l'existence d'impuretés chirales au sein des

solvants utilisés, sous forme de traces difficilement détectables, mais suffisantes pour promouvoir une synthèse asymétrique.

Dès lors, on s'intéressa de plus près aux quantités et à la qualité de l'inducteur chiral ici nécessaire. Par exemple l'addition de l'alcool **13** à raison de 0,8 % dans le milieu, et caractérisé par un ee d'environ 0,0005 % seulement conduisait après un cycle réactionnel à un produit de 57 % ee, de configuration S également. D'autre part, des sources de chiralité différant du produit lui-même peuvent être utilisées pour atteindre de hautes sélectivités (schéma 10).

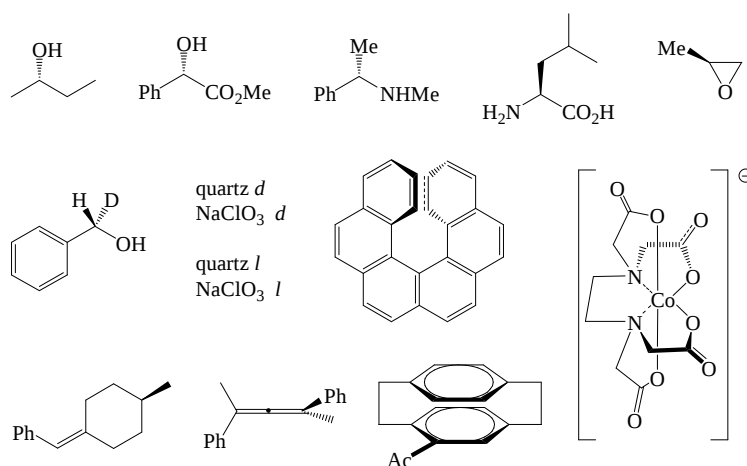


schéma 10

Parmi ces inducteurs chiraux testés et comprenant un centre asymétrique figurent les alcools, époxydes, esters carboxyliques, amines, ainsi que les acides aminés. On notera particulièrement qu'un composé à l'asymétrie presque négligeable tel l'alcool (S)- α -deutérobenzilique, ajouté à raison de 0,02 à 0,05 mol % (95% ee), est toutefois suffisant pour permettre la production du produit R avec un ee de 95%¹⁵. De plus, des composés à chiralité plane, axiale ou hélicoïdale ainsi que des complexes furent inclus dans les tests. Les cristaux de quartz donnent également accès à de très hautes énantiosélectivités (99.5% après trois cycles réactionnels).

A partir de l'alcool **13** présentant un très faible excès énantiomérique (0,005% environ) obtenu par photolyse sous l'influence de lumière circulaire

polarisée, et injecté dans le milieu réactionnel à raison de 1%, des ee de 65 % ont pu être atteints. Ceci est une nouvelle fois à mettre en relation avec l'homochiralité des acides aminés découverts au sein des météorites, formés sans doute de la même façon et qui auraient pu servir de matériel organique non racémique pendant l'ère prébiotique¹⁶⁻¹⁹.

1.6.2 Amplification : effet non-linéaire

L'amplification de l'excès énantiomérique décrit au point précédent se réalise et s'explique par un phénomène très important : l'effet non-linéaire. On s'attend a priori à ce qu'en catalyse organométallique par exemple, un ligand chiral permette d'atteindre un niveau d'énantiosélectivité pour la réaction qu'il promeut, relatif à son ee propre, ce que décrit la droite A de la figure 3.

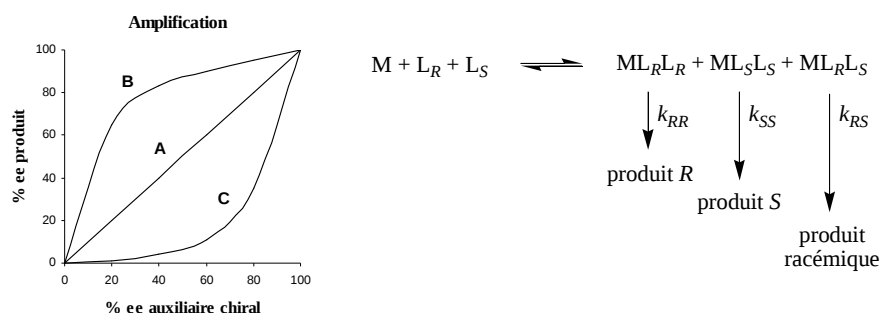


figure 3

Toutefois, Kagan *et al.* investiguèrent le champ des réactions sous influence de ligands non énantiomériquement purs, notamment dans le cadre d'oxydations et d'aldolisations asymétriques²⁰. Ils observèrent qu'un ligand de pureté optique modeste pouvait amener un niveau élevé d'énantiosélectivité (courbe B, figure 3). On parle alors d'effet non-linéaire positif. L'explication tient au fait que se forment dans le milieu des complexes de type « homoligands » ou « hétéroligands » dont la stabilité et/ou la réactivité relative détermine l'évolution de la réaction²¹. Le phénomène est décrit par les équations de la figure 3 où M représente un métal capable de s'associer avec les deux énantiomères d'un ligand, LR et

LS. Un effet non linéaire négatif peut également s'observer (courbe C, figure 3).

Les effets non-linéaires résultent donc de la participation de deux, voire plusieurs, molécules de ligands au mécanisme de la réaction, au contraire de la linéarité qui témoigne généralement d'un mécanisme associant un ligand à un seul atome métallique.

Au rang des premiers exemples marquants d'amplification chirale, il convient de citer celui du (-)-DAIB **14**, catalyseur de l'alkylation du benzaldéhyde par du $\text{Zn}(\text{Et})_2$, que détaille le schéma 11.

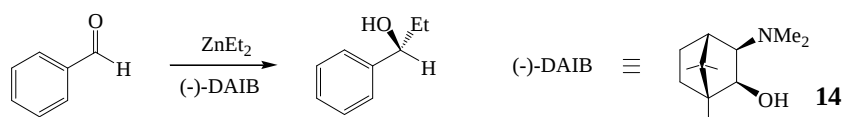


schéma 11

Typiquement, on remarque qu'un e.e. de 15 % pour le (-)-DAIB peut conduire à un e.e. de 95 % dans le chef du produit d'alkylation (S). On constate que l'augmentation progressive de la pureté énantiomérique du ligand n'améliore ensuite qu'en de très faibles proportions la pureté énantiomérique du produit (S) ; le ligand énantiomériquement pur conduit à 98 % d'e.e. La courbe de type B, ici très convexe, en regard de la linéarité à laquelle on aurait a priori pu s'attendre, n'est pas due à la participation de deux molécules auxiliaires par aldéhyde dans l'état de transition, mais résulte d'une reconnaissance unique dans le précurseur catalytique dimérique, comme l'illustre le schéma 12.

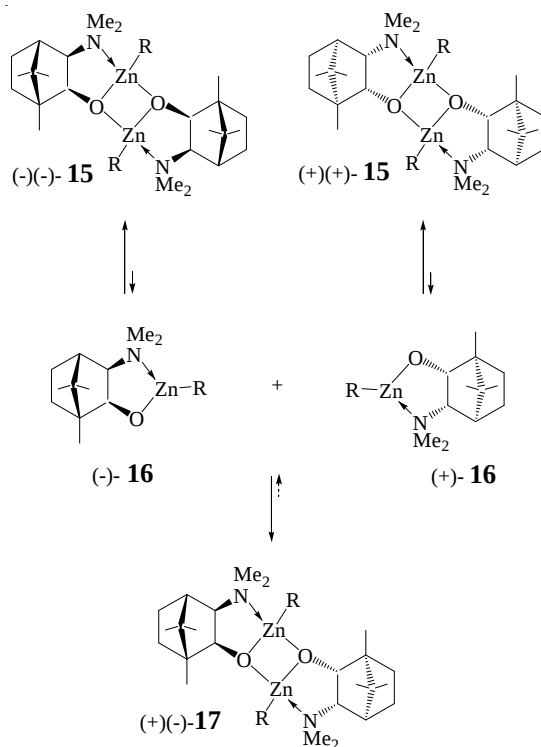


schéma 12

La non-linéarité résulte de la différence manifeste des propriétés chimiques des précurseurs catalytiques dimériques **15** et **17**. Le complexe dinucléaire méso **17** est thermodynamiquement plus stable, comparé à **15**. Lorsque l'on considère la réaction en présence de DAIB non racémique mais non énantiomériquement pur, générant **15** et **17** dans un rapport qui est sous contrôle thermodynamique, **15** possède une tendance plus grande à se dissocier en **16**, le monomère actif, c'est pour cette raison qu'une plus grande activité catalytique est observée. La différence entre ces complexes **15** et **17** peut aisément être comprise en considérant l'encombrement stérique relatif du système cyclique central 5/4/5 syn ou anti. L'examen des structures cristallines montre effectivement une valeur différente de l'angle dièdre des cycles à quatre et à cinq; si R est un groupe méthyle, ces angles valent respectivement pour **15** et **17**, 135-146° et 112-124°.

Si le ligand chiral est non racémique et non énantiomériquement pur, l'énantiomère en défaut se retrouvera majoritairement impliqué dans le complexe dimérique **17**, et sa fraction molaire sous forme de monomère actif sera extrêmement réduite en comparaison de celle que possèdera l'autre énantiomère. Ce dernier sera donc celui qui majoritairement assurera la synthèse ; ainsi s'explique la non linéarité observée.

1.7 Conclusion

Depuis de très nombreuses années, la chiralité dans toute son étendue se révèle, à l'examen de son origine, comme un phénomène énigmatique, même si depuis lors une kyrielle de propositions visant à l'expliquer se sont accumulées. Certaines parmi le plus sérieuses, telle que l'intrigante brisure de symétrie, permettent de lui supposer une genèse aléatoire tandis que d'autres comme la violation de parité ou la LCP expliqueraient un biais dirigé de type « gauche » que l'on observe notamment concernant l'homochiralité prépondérante dans la nature. Encore faut-il à présent remonter plus en amont pour accéder à(aux) la source(s) potentielle(s) de ce biais.

Quoiqu'il en soit, ne négligeons pas que la croûte terrestre de l'ère prébiotique était sujette à de grands bouleversements. Une rupture de symétrie par cristallisation, la contribution de champs magnétiques importants et de rayonnements tels ceux que nous avons cités ne peuvent sous pareilles conditions être écartées comme sources de molécules chirales d'abord abiotiques. Des formes primitives d'ARN, ADN et de squelettes peptidiques auraient alors pu se développer. La vie aurait enfin émergé, comme une conséquence des lois de la chimie ; sorte de phénomène cosmique dont notre système solaire ne doit pas être le seul à avoir bénéficié...

