

La biodégradation des polluants organiques

Métabolisme, estimation des risques, dépollution et biodétection

Jamal Ouazzani

Summary

Biodegradation of organic pollutants. Metabolism, risk assessment, bioremediation and biodetection

The presence of toxic organic pollutants in soils and aquifers contribute to the development of highly resistant microorganisms. This resistance is the consequence of partial or total degradation of the pollutant by enzymes. Elucidation of enzymatic mechanisms and identification of the metabolites help to predict the impact of the pollution on public health and environment, and the urgency of prevention and remediation processes. Based on a representative and accurate example, this paper describes both fundamental and applied benefits in investigating microbial degradation of organic pollutants.

Mots-clés

Biodégradation, polluants organiques, cytotoxicité, micro-organismes, trinitrotoluène.

Key-words

Biodegradation, organic pollutants, cytotoxicity, microorganisms, trinitrotoluene.

La pollution chimique que connaît actuellement la planète n'est pas le seul fait des xénobiotiques, substances non naturelles produites principalement par les industries chimiques (pesticides, détergents, colorants, explosifs...). Elle est aussi et surtout le résultat de l'accumulation, du déplacement et de la transformation de produits naturels d'origine géologique (hydrocarbures...) ou anthropogénique (ordures, lisier, boues de stations d'épuration, produits d'incinération...). Deux types de risques sont à déplorer, les risques environnementaux et les risques pour la santé publique. La notion de risque socio-économique est apparue récemment et reflète l'incidence d'une pollution sur le développement, voire la survie, d'une région ou d'une activité. Dans la majorité des cas, la pollution recouvre ces différents risques.

La biodégradation est le facteur naturel majeur d'élimination et de recyclage des déchets organiques. Il se distingue de la bioconversion par le nombre généralement important de réactions mises en jeu (figure 1). Certains polluants résistent cependant à la biodégradation et persistent avec des temps de demi-vie qui peuvent atteindre un demi-siècle ou plus. Ces produits qualifiés de récalcitrants sont généralement des xénobiotiques, mais certains produits naturels le sont également (lignine). Cette résistance à la biodégradation est due soit à une cytotoxicité accrue du polluant qui finit par stériliser le milieu contaminé, soit à une structure chimique inaccessible aux attaques enzymatiques. La biodégradation, en tant que procédé de décontamination, vise à mettre au point des méthodes microbiologiques utilisables en milieu ouvert, et transposables à une échelle pouvant atteindre des milliers de m³ d'effluents ou des centaines de tonnes de sols contaminés. Ces contraintes excluent de manière générale l'utilisation d'enzymes purifiées en biodépollution et justifient l'utilisation d'organismes vivants, principalement

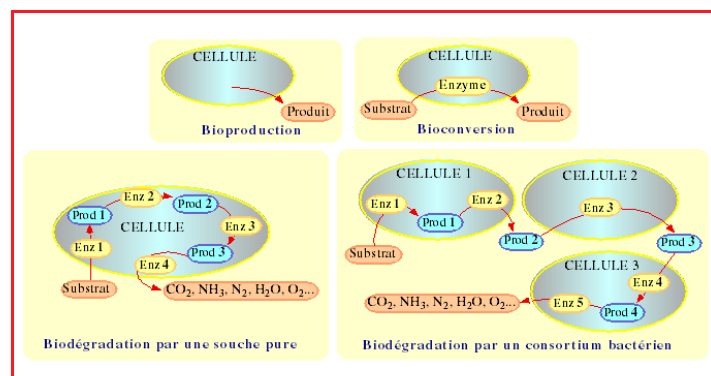


Figure 1 - L'objectif final de la biodégradation est de transformer des substrats organiques en produits minéraux, en faisant intervenir plusieurs enzymes exprimées soit par un micro-organisme unique, soit par un groupe de micro-organismes (consortium).

des micro-organismes. La deuxième raison qui exige l'utilisation d'organismes vivants est la prédominance en biodégradation de réactions d'oxydoréduction nécessitant la régénération permanente de cofacteurs, qui ne peut être assurée de manière économiquement viable qu'*in vivo*. Quelques exemples d'utilisation de préparations enzymatiques, principalement des hydrolases, sont cependant rapportés pour la biodégradation de graisses.

La pression de sélection, imposée dans le milieu contaminé par le polluant, laisse émerger quelques micro-organismes (*Phanerochaete*, *Pseudomonas*, *Bacillus*...) dotés d'enzymes extrêmement efficaces pour la dégradation des substances organiques récalcitrantes. Cette capacité d'adaptation, vitale pour le micro-organisme, répond à deux besoins fondamentaux. Le premier, qui se rencontre chez tous les

êtres vivants, consiste à échapper à la cytotoxicité du polluant en le transformant en dérivés moins toxiques. Nous pouvons citer comme exemples la N-acétylation des amines et hydroxylamines aromatiques, la dénitrification de nitro-aromatiques et toutes les réactions d'oxydation qui visent à faciliter l'élimination des xénobiotiques. Ces réactions de protection se retrouvent aussi chez les mammifères et l'Homme en particulier. Le deuxième besoin vital, spécifique aux micro-organismes, s'exprime dans des conditions nutritives limitantes, et le polluant sert comme source nutritive ou énergétique (source de carbone, d'azote ou de soufre). Citons ainsi l'utilisation de l'atrazine par certains micro-organismes comme source de carbone et d'azote (figure 2), et l'utilisation du dibenzothiophène comme source de soufre et de carbone (voir l'article de J.-P. Vandecasteele *et al*). Ces deux molécules sont hautement récalcitrantes, mais en absence de sources nutritives plus simples, les micro-organismes finissent par détourner des enzymes du métabolisme pour les dégrader. En cas d'exposition prolongée, les enzymes de ces micro-organismes évoluent jusqu'à devenir spécifiques de tel ou tel polluant. Ces adaptations, développées au cours de l'évolution du micro-organisme, peuvent être améliorées par des techniques de pression de sélection et, lorsque les législations le permettront, par des techniques de génie génétique. En effet, l'intervention des micro-organismes en milieu ouvert interdit jusqu'à présent l'utilisation d'espèces génétiquement modifiées (OGM). Ceci n'exclut pas les études de laboratoires et quelques essais pilotes réalisés en milieu confiné [1].

La meilleure manière d'aborder un domaine aussi vaste que la biodégradation est de le traiter au travers d'un exemple. Ce dernier doit donner une idée générale de l'intérêt et des limites de la biodégradation des polluants. Il doit aussi

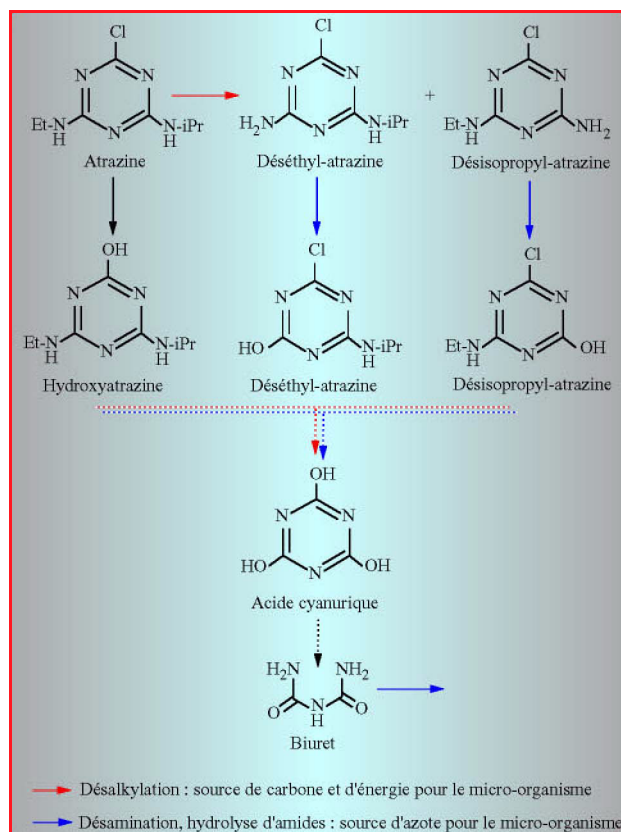


Figure 2 - Utilisation du pesticide atrazine comme source nutritive par les micro-organismes.

révéler les retombées et les bénéfices fondamentaux et appliqués. L'une des molécules qui permet d'aborder tous ces aspects est le 2,4,6-trinitrotoluène ou TNT. Ce produit fait partie d'une famille particulière de polluants, les produits énergétiques ou explosifs. Dans cette famille, le TNT est de loin le plus récalcitrant et constitue depuis des décennies un défi pour les chercheurs qui œuvrent dans le domaine de la biodégradation.

Les explosifs font partie d'une superfamille moléculaire à haut risque pour l'environnement et la santé publique, les nitro-aromatiques. Dans cette famille, on retrouve des pesticides, des colorants et des produits pharmaceutiques. Comme les métabolites principaux formés dans l'environnement sont les produits de nitroréduction, les nitro-aromatiques rejoignent sur le plan toxicologique les amines aromatiques. En effet, ils conduisent tous deux aux hydroxylamines, les nitro par réduction et les amines par N-oxydation. Comme la nitroréduction est bien plus répandue que la N-oxydation des amines, les nitro-aromatiques sont potentiellement plus toxiques que les amines aromatiques.

La nitroréduction est une réaction universelle qu'on retrouve chez tous les êtres vivants. Elle se déroule aussi bien en aérobie qu'en anaérobie (ce qui n'est pas le cas de la N-oxydation d'amines primaires), et emprunte une deuxième voie cytotoxique qui implique des espèces activées de l'oxygène (figure 3).

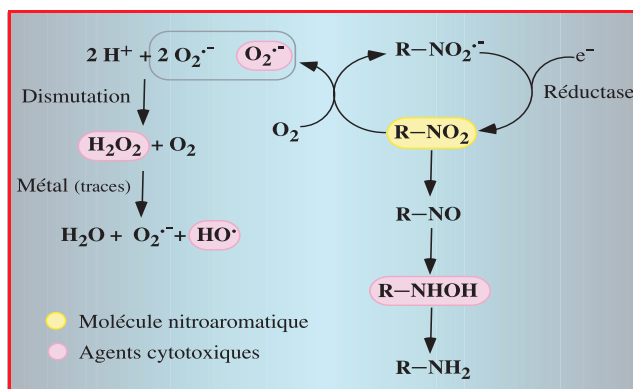


Figure 3 - Les nitroréductases engendrent une cytotoxicité au travers de deux voies :

- 1) La voie productive conduit à la formation d'amines primaires avec la production d'hydroxylamines intermédiaires.
- 2) Le cycle futile est observé en présence d'oxygène et conduit à des espèces activées cytotoxiques.

Les premières hydroxylamines stables qui ont été caractérisées sont celles qui proviennent de la nitroréduction du TNT. Elles ont été isolées dans les urines de lapin auxquels le TNT a été administré, et ont fait depuis l'objet d'études toxicologiques exhaustives.

L'étude de la biodégradation des nitro-aromatiques permet d'élaborer des stratégies de dépollution des sols ou des eaux contaminées. Ces procédés sont basés soit sur l'exploitation des micro-organismes déjà présents dans le milieu contaminé, soit sur l'introduction de micro-organismes efficaces. L'autre intérêt dans l'étude de la biodégradation du TNT est la conception de « renifleurs enzymatiques » (biocapteurs) qui permettront de détecter en milieu ouvert, les quantités infimes de TNT qui s'échappent de colis suspects ou des mines antipersonnelles. Ces renifleurs enzymatiques pourront se substituer au

système olfactif canin, seul capable de détecter de manière fiable et en milieu ouvert, la présence de ces produits.

Cytotoxicité

Le terme polluant désigne toute molécule toxique pour la faune et la flore ayant des répercussions sur l'environnement et la santé publique. Le TNT et ses métabolites sont toxiques pour l'Homme et les mammifères en général, pour les invertébrés, poissons, micro-organismes, algues etc. [2]. La toxicité du TNT, comme celle de l'ensemble des nitro-aromatiques, reste associée à leur métabolisation et à la réaction de nitroréduction en particulier (figure 3). Cette réaction se caractérise par deux voies : une voie productive qui conduit à partir du nitro à l'amine correspondante en passant par des intermédiaires nitroso et hydroxylamine. La deuxième voie, appelée « cycle futile », est catalysée par les nitroréductases en présence d'oxygène. Il s'agit d'un va-et-vient permanent entre la forme nitro et le radical anion. Ce cycle futile génère directement des anions superoxydes dont la dismutation conduit au peroxyde d'hydrogène qui, en présence de traces de métal, évolue en radical hydroxyle. L'ensemble entraîne les dommages classiques attribués d'une part aux hydroxylamines et d'autre part aux espèces activées de l'oxygène. Ces entités, extrêmement réactives chimiquement, vont interagir avec des molécules biologiques (protéines, ADN...) et provoquer une détresse respiratoire, un stress oxydant et des lésions au niveau de l'ADN, qui expliquent le caractère cancérigène de ces molécules. Elles peuvent aussi inhiber l'activité de différentes protéines induisant ainsi des désordres physiologiques [16].

La toxicité du TNT vis-à-vis des micro-organismes lui permet d'éradiquer la flore des sols qu'il contamine. Ceci, conjugué avec une stabilité chimique élevée et une résistance aux facteurs abiotiques (rayonnement, chaleur), assure la persistance du TNT.

Récalcitrance

Le terme molécule récalcitrante concerne tout composé qui résiste aux attaques enzymatiques et qui, par conséquent, n'est pas biodégradable. Ce n'est pas exactement le cas du TNT qui est transformé par les micro-organismes en différents métabolites. Le problème est que les métabolites ne sont pas forcément moins cytotoxiques ou plus biodégradables que le TNT, et que le squelette aromatique qui porte les groupements actifs ne subit quasiment pas de minéralisation (rupture du cycle aromatique et transformation de ses carbones en CO_2). La difficulté à minéraliser le TNT vient d'une part de sa cytotoxicité et d'autre part de sa structure. En effet, le nombre et la disposition des groupements nitro revêtent une importance capitale. Les groupes nitro par leur haut degré d'oxydation, leur nature électrophile (effet électronique) et leur disposition alternée sur le cycle aromatique (effet stérique) empêchent l'attaque enzymatique de ce dernier. Des analogues du TNT mono- ou dinitrés sont par contre facilement biodégradables et minéralisables (figure 4).

Association avec les composants du sol

Comme beaucoup de polluants qui contaminent les sols, le TNT et ses métabolites réduits s'associent de manière

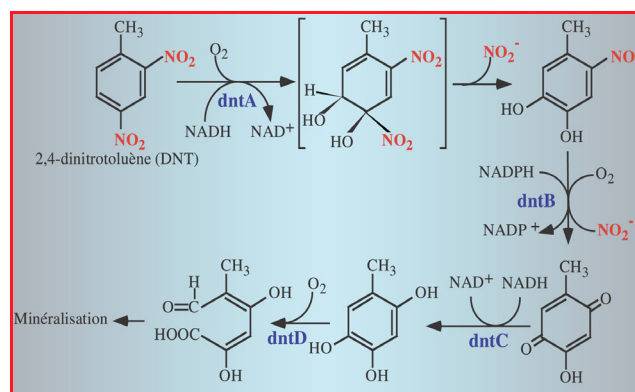


Figure 4 - Minéralisation du 2,4-dinitrotoluène par la bactérie *Pseudomonas DNT*. Les oxydations successives sont catalysées par différentes dioxygénases.

réversible ou irréversible avec les composants minéraux et organiques du sol (acides humiques, argiles). Cette part non négligeable du polluant ne peut être éliminée qu'après sa mobilisation du sol par des traitements chimiques divers (lessivage, extraction...). La phytoremédiation (utilisation des plantes en dépollution) permet dans certains cas de mobiliser les contaminants au niveau de la rhizosphère et de les rendre accessibles aux attaques microbiennes (voir l'article de J.-L. Morel).

Multiplicité des voies métaboliques

Selon le micro-organisme étudié et les enzymes qu'il exprime, selon les conditions aérobie ou anaérobie dans lesquelles sont menées les expériences et selon l'addition de co-substrats et autres additifs, les voies de dégradation des polluants sont extrêmement diversifiées. D'autres différences apparaissent lorsqu'on utilise des souches pures ou des mélanges de souches, actives par exemple dans un compost ou une boue activée. Le TNT n'échappe pas à cette règle. En aérobie, les réactions principales sont des nitroréductions. Les amines formées subissent ensuite des acylations ou participent à la formation de dimères. Dans ces conditions, les micro-organismes n'arrivent pas à tirer profit du TNT car on n'observe quasiment pas de réactions de dénitrification ni de déamination, capables de libérer des sources d'azote pour le micro-organisme. On n'observe pas non plus de minéralisation qui témoignerait de la rupture du cycle aromatique, source potentielle de carbone pour le micro-organisme. Pour les autres molécules nitro-aromatiques, la minéralisation passe toujours par la formation d'analogues du catéchol, seuls capables d'être minéralisés par les voies ortho et méta de dégradation du catéchol [3].

En anaérobie, la biodégradation du TNT implique aussi des réactions de nitroréduction, qui aboutissent à la formation de dérivés di- et triamines. La dégradation ultérieure de ces dérivés, et principalement leur déamination, fait l'objet de quelques controverses. Il n'en reste pas moins que certains micro-organismes, anaérobies stricts, utilisent en milieu minimum le TNT comme source de carbone et d'azote.

Réactions enzymatiques particulières

La dénitrification du TNT et la déamination de ses dérivés réduits sont sans doute les deux réactions qui permettent de

transformer le TNT en dérivés biodégradables. Malheureusement, ce sont les deux réactions limitantes les plus controversées et les moins documentées, aussi bien en ce qui concerne les enzymes impliquées que les mécanismes mis en jeu.

Dénitration microbiologique du TNT

Spain et Knackmuss ont montré que *Rhodococcus sp.* et *Mycobacterium sp.* convertissent le TNT en « dihydrure de Meisenheimer » [4], mais ils n'ont pas observé de dénitrification (figure 5). Par contre, Shea et coll. ont montré que *Pseudomonas savatoni* était capable de dénitrifier le TNT, en mettant en évidence la formation du 2,4-DNT et la production de nitrites [5]. Dans tous les cas, la minéralisation du cycle aromatique du TNT restait négligeable. Nous avons sélectionné au laboratoire le champignon filamenteux *Penicillium LCM* [15], qui présente des capacités exceptionnelles à dégrader le TNT. En absence d'une source de carbone dans le milieu d'incubation (glucose), cette souche catalyse en aérobie la dénitrification du TNT, mais pas sa minéralisation. Par contre, en présence de glucose, *Penicillium LCM* minéralise plus de 70 % du TNT, présent en solution aqueuse à concentration saturante de 100 mg/L [15].

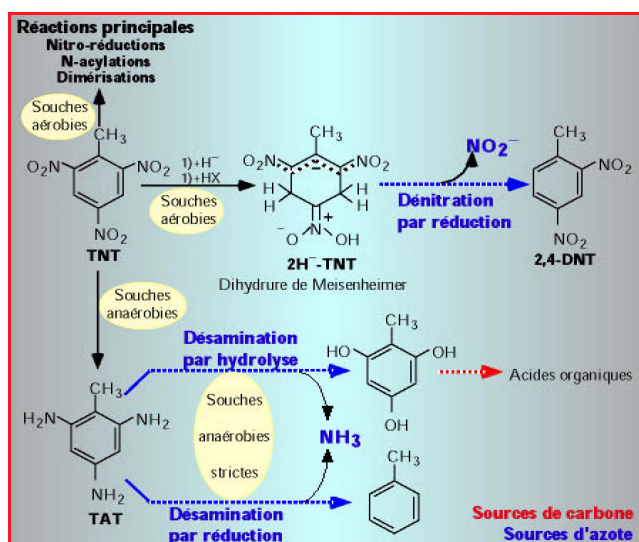


Figure 5 - Dénitration et déamination du TNT.

Les flèches bleues indiquent les voies qui constituent des sources d'azote pour le micro-organisme, les flèches rouges indiquent les voies qui constituent des sources de carbone.

Contrairement au cas du TNT, où les enzymes responsables de la dénitrification n'ont pas été étudiées, la dénitrification du 2,4-dinitrotoluène a été complètement élucidée. Les différentes voies métaboliques qui aboutissent à la minéralisation de la molécule ainsi que les enzymes impliquées ont été identifiées (figure 4) [7].

Déamination microbiologique des métabolites réduits du TNT

En aérobie, les dérivés mono- et diamnés du TNT ne subissent pas de déamination. Ils se dimérisent ou

s'accumulent dans le milieu. Par contre, en anaérobie stricte, les trois groupements nitro peuvent être réduits, le triaminotoluène TAT formé peut subir une déamination réductive. La formation de para-crésol et du toluène sont rapportés comme des intermédiaires de la dégradation du TAT par différents micro-organismes anaérobies stricts (figure 5).

Phytoremédiation et TNT

La phytoremédiation consiste à cultiver des plantes sur des sites contaminés par différents polluants organiques ou minéraux. Ces plantes aquatiques ou terrestres doivent résister au polluant et permettre son accumulation avec ou sans biotransformation (voir l'article de J.-L. Morel). La phytoremédiation peut être utilisée seule ou en association avec des micro-organismes.

Des travaux récents menés sur un site de production de munitions à l'Iowa (États-Unis) ont montré que des plantes aquatiques (cornifle nageante, elodée...) arrivaient à réduire la concentration du TNT dans des eaux contaminées. Aucune trace de TNT n'a été retrouvée dans les différents tissus de la plante et aucune minéralisation n'a été observée ; cependant, des produits de monoréduction ont été identifiés [8].

L'idée qui fait actuellement son chemin est de pouvoir coupler l'efficacité des végétaux à accumuler les polluants organiques, et la capacité des micro-organismes à les dégrader. Ceci a été tenté dans le cas des explosifs en introduisant un gène bactérien codant pour la pentaérythritol tétranitrate réductase dans des plants de tabac [9]. Le tabac transgénique obtenu se développe sur des milieux contenant la trinitroglycérine TNG (1 mM) ou de faibles concentrations de TNT (0,05 mM), alors que le tabac sauvage en est incapable. Le tabac transgénique transforme plus rapidement que le sauvage la trinitroglycérine en dérivés mono- et dinitrés. Par contre, les produits de transformation du TNT n'ont pas encore été identifiés. La méfiance reste de rigueur pour ces différentes expériences, car il faut que de tels systèmes dégradent totalement l'explosif pour éviter l'accumulation dans les plantes des intermédiaires métaboliques, plus cytotoxiques que le polluant d'origine.

Utilisation de méthodes couplées, chimie propre-microbiologie

La biodégradation d'un polluant se trouve parfois compromise par une première étape de transformation inopérante (déhalogénéation, déméthylation, dénitrification...). Plusieurs chercheurs ont tenté de lever ce blocage en associant à la biodégradation des méthodes chimiques propres, regroupées sous le nom de « procédés d'oxydations avancés » (photolyse, Fenton, peroxyde d'hydrogène...). Nous avons exploré au laboratoire cette possibilité dans le cas de l'atrazine pour laquelle la photolyse permet la déhalogénéation et la déalkylation, mais pas la minéralisation de l'acide cyanurique obtenu. Les micro-organismes sont par contre capables de minéraliser l'acide cyanurique (figure 2). Une approche similaire a été adoptée dans le cas du TNT et a montré en milieu naturel la complémentarité entre les facteurs abiotiques (rayonnement, acidité des sols...) et la biodégradation [10].

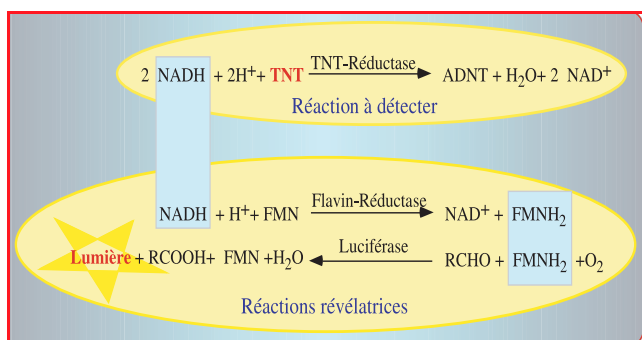


Figure 6 - Un biocapteur basé sur la nitroréduction du TNT a été élaboré.

Il associe à une réaction enzymatique spécifique une réaction révélatrice. En absence de TNT, le système émet une lumière basale ; par contre, en présence de TNT, on assiste à une extinction de cette lumière émise qui est proportionnelle à la concentration de TNT.

Utilisation des biotechnologies pour augmenter l'efficacité de la biodégradation

La mise en œuvre de micro-organismes génétiquement modifiés, destinés à la dépollution en milieu ouvert, est actuellement interdite [1]. Cependant, plusieurs études de laboratoire cherchent à améliorer les performances de micro-organismes en biodégradation. Deux voies sont explorées actuellement : la première vise à compléter le chemin métabolique d'un micro-organisme pour aboutir à l'élimination du polluant considéré, la seconde vise à concevoir des micro-organismes exprimant les familles d'enzymes les plus impliquées dans les biodégradations. Ainsi, pour le TNT, Ramos et coll. ont utilisé une souche de *Pseudomonas* capable d'utiliser le TNT comme source d'azote pour croître mais pas comme source de carbone [11]. Ils ont introduit dans cette souche un plasmide codant pour la toluène-dioxygénase, enzyme qui minéralise le toluène et qui rappelle les enzymes de dégradation du catéchol [3]. Le micro-organisme hybride obtenu utilise, dans un milieu de culture pauvre, le TNT comme source d'azote et de carbone. En présence d'autres sources de carbone plus faciles à assimiler, le TNT n'est plus minéralisé. Dans la deuxième démarche, le but n'est pas d'améliorer le micro-organisme, mais plutôt d'améliorer les enzymes en augmentant l'éventail de leurs substrats ou leur efficacité catalytique. Ces recherches sont basées sur des biotechnologies comme le DNA-shuffling ou les échanges de domaines entre enzymes ; ces différentes techniques doivent encore faire leurs preuves [12].

Utilisation des enzymes comme biocapteurs pour détecter le TNT

L'utilisation de biocapteurs est généralement basée sur une reconnaissance de type antigène-anticorps ou de type enzymatique. L'utilisation de micro-organismes rapporteurs est moins utilisée, mais peut constituer une alternative de choix pour les applications de terrain. L'objectif est d'atteindre la plus grande sensibilité de détection et la plus grande spécificité de reconnaissance. En ce qui concerne les

explosifs, les trois techniques ont été envisagées et méritent d'être améliorées. L'un des défis est de pouvoir utiliser ces biocapteurs pour délimiter des zones contaminées ou pour repérer l'emplacement de mines antipersonnelles. Ce problème est extrêmement sensible car plus de 110 millions de ces mines sont disséminées dans 68 pays, et 100 autres millions stockés dans une centaine de pays.

Les biocapteurs enzymatiques peuvent être exploités *in vivo* ou *in vitro*. L'avantage de l'utilisation *in vivo* est de pouvoir répandre directement le micro-organisme rapporteur. Ce micro-organisme capable de convertir le polluant recherché va associer à la réaction de biotransformation une réaction de révélation qui aboutira à un repérage précis des zones contaminées ou des emplacements de mines (figure 6) [13].

Bénéfices fondamentaux et appliqués de telles études

Les polluants organiques les plus récalcitrants ont été conçus avec deux contraintes majeures, un maximum d'efficacité et un maximum de stabilité. Ceci a conduit à des structures chimiques simples mais extrêmement résistantes à la dégradation. La cytotoxicité des polluants, et par conséquent le risque qui pourrait découler de leur ingestion, est souvent révélée par l'étude des enzymes qui les transforment et par la structure de leurs métabolites [14]. Le TNT a été l'une des premières molécules qui a révélé la cytotoxicité liée à la réaction de nitroréduction. Cette connaissance a permis de prévenir les risques, en encadrant l'utilisation industrielle et pharmaceutique des nitro-aromatiques. La cytotoxicité liée à la réaction de nitroréduction a été exploitée aussi sur le plan thérapeutique, en ciblant les cellules anoxiques (peu oxygénées) telles que celles des tumeurs solides où la réaction de nitroréduction est très active. Plusieurs dérivés nitrés ont ainsi été testés comme antitumoraux potentiels ou comme outils de thérapie génique (figure 7). La biodégradation a largement fait ses preuves comme technique de réhabilitation de sites contaminés principalement par les hydrocarbures. Pour les explosifs, plusieurs expériences sont en cours exploitant des procédés tels que ceux mis au point dans notre laboratoire [15].

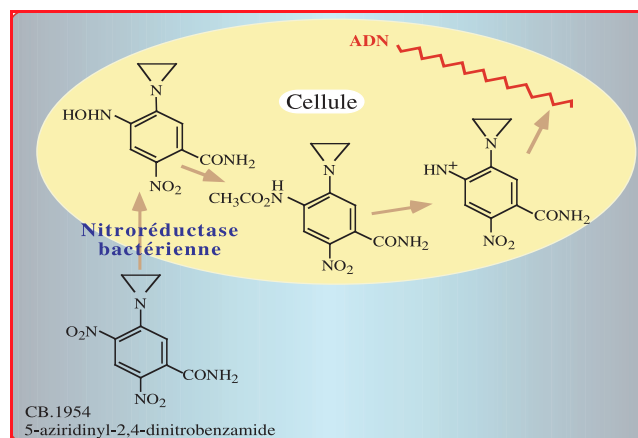


Figure 7 - Activation du CB.1954 par nitroréduction.

Dans le cas de cellules cancéreuses insensibles au CB.1954, l'introduction du gène d'une nitroréductase bactérienne permet de réduire le groupement nitro et d'activer le CB.1954. La combinaison entre le caractère bi-alkylant du produit de nitroréduction, et de la cytotoxicité de l'hydroxylamine intermédiaire aboutit à la mort de la cellule cancéreuse.

Références

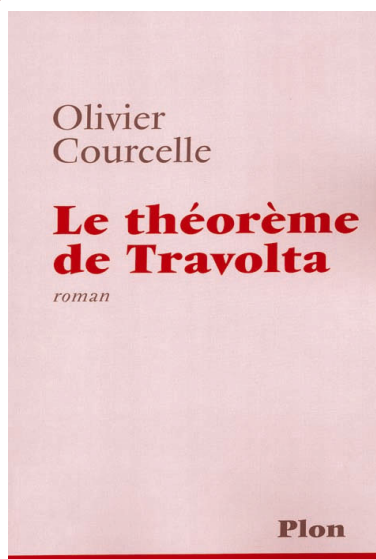
- [1] Saylor G.S., Ripp S., Field Application of genetically engineered microorganisms for bioremediation processes, *Curr. Opin. Biotechnol.*, **2000**, *11*, p. 286.
- [2] Perchermeier M.M., Kiefer F., Wiebel F.J., Toxicity of monocyclic and polycyclic nitroaromatic compounds in a panel of mammalian test cell lines, *Toxicol. Lett.*, **1994**, *72*, p. 53 ; Lotufo G.R., Farrar J.D., Inouye L.S., Bridges T.S., Ringelberg D.B., Toxicity of sediment-associated nitroaromatic and cyclonitramine compounds to benthic invertebrates, *Environ. Toxicol. Chem.*, **2001**, *20*, p. 1762.
- [3] Broderick J.B., Catechol dioxygenases, *Essays in biochemistry*, **1999**, *34*, p. 173.
- [4] Vorbeck C., Lenke H., Fisher P., Spain J.C., Knackmuss H.J., Initial reductive reactions in aerobic microbial metabolism of 2,4,6-trinitrotoluene, *Appl. Environ. Microbiol.*, **1998**, *64*, p. 246.
- [5] Martin J.L., Comfort S.D., Shea P.J., Kokjohn T.A., Drijber R.A., *Can. J. Microbiol.*, **1997**, *43*, p. 447.
- [6] Anusevicius Z., Sarlauskas J., Nivinskas H., Segura-Aguilar J., Cenas N., *FEBS. Lett.*, **1998**, *436*, p. 144.
- [7] Suen W.C., Spain J.C., Cloning and characterisation of *Pseudomonas* sp. Strain DNT genes for 2,4-dinitrotoluene degradation, *J. Bacteriol.*, **1994**, *175*, p. 1831.
- [8] Best E.P., Sprecher S.L., Larson S.L., Fredrickson H.L., Bader D.F., Environmental behaviour of explosives in groundwater from the Milan Army Ammunition Plant in aquatic and wetland plant treatments, *Chemosphere*, **1999**, *39*, p. 2057.
- [9] French C.E., Rosser S.J., Davies G.J., Nicklin S., Bruce N.C. Biodegradation of explosives by transgenic plants expressing pentaerythritol tetranitrate reductase, *Nature Biotechnol.*, **1999**, *17*, p. 491.
- [10] Hwang H.M., Slaughter L.F., Cook S.M., Cui H., Photochemical and microbial degradation of 2,4,6-trinitrotoluene (TNT) in a freshwater environment, *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, **2000**, *65*, p. 228.
- [11] Duque E., Haidour A., Godoy F., Ramos J.L., Construction of a pseudomonas hybrid strain that mineralizes 2,4,6-trinitrotoluene, *J. Bacteriol.*, **1993**, *175*, p. 2278.
- [12] Furukawa K., Engineering dioxygenases for efficient degradation of environmental pollutants, *Curr. Opin. Biotechnol.*, **2000**, *11*, p. 244.
- [13] Egghart H.C., The meradcom *in vitro* biosensor program. *Report Mercadom- 2364*, order n° AD-A127766 US, **1983**, *83(17)*, p. 4188 ; Fliermans C.B., Lopez-De-Victoria G., Microbial mine detection system (NMDS), *S.P.I.E.*, **1998**, *3392*, p. 462.
- [14] Le Campion L., Delaforge M., Noël J.-P., Ouazzani J., Metabolism of ¹⁴C-labelled 5-nitro-1,2,4-triazole-3-one (NTO): comparison between rat liver microsomes and bacterial metabolic pathways, *J. Molecular Catalysis B-Enzymatic*, **1998**, *5*, p. 395.
- [15] Ouazzani J., Le Campion L., *Microbial process for nitroaromatics remediation*, **1999**, PCT/FR99/02314.
- [16] Gross P., Biologic activity of hydroxylamine: a review, *Crit. Rev. Toxicol.*, **1985**, *14*, p. 87.



Jamal Ouazzani

est chargé de recherche à l'Institut de Chimie des Substances Naturelles*.

* Institut de Chimie des Substances Naturelles, UPR 2301 CNRS, avenue de la Terrasse, 91198 Gif-sur-Yvette Cedex.
Tél. : 01 69 82 30 60. Fax : 01 69 07 72 47.
E-mail : jamal.ouazzani@icsn.cnrs-gif.fr



Le théorème de Travolta
Olivier Courcelle
Éditions Plon, août 2002, 310 pages, 18 €

Le Congrès international des mathématiciens de Genève est la grand-messe des mathématiciens. Attirés par ces paillettes fractales et géométriques, trois jeunes ratés du théorème pétris de névroses décident d'y faire un tour. Le premier, Jean-Jacques, pour s'y faire des copains et acheter un Rousseau en plastique à sa maman prof de français. Le deuxième, Faroud (de Marrakech), pour faire enrager son jumeau Mourad et exposer un bref quart d'heure le minable poster qu'il a bricolé à partir de sa lamentable thèse. Le troisième, Uriel Muller, obscur gratte-papier dans une sous-gazette locale, pour rencontrer enfin des types plus moches que lui (les mathématiciens) et préparer son futur best-seller : *Le Guide pratique des mathématiques*.

Un hasard malicieux veut que ces trois paumés s'acquinent, unissant leurs poisses respectives...

Dans la droite ligne de David Lodge, une satire désopilante du milieu improbable des mathématiciens – par un ex-mathématicien...