

Sous la direction de
CLAIRE-MARIE PRADIER

Coordonné par
FRANCIS TEYSSANDIER et OLIVIER PARISEL

Étonnante chimie

Découvertes et
promesses du **xxi^e** siècle



CNRS EDITIONS

Sous la direction de Claire-Marie Pradier
Coordonné par Olivier Parisel
et Francis Teyssandier

Étonnante chimie

CNRS ÉDITIONS

15, rue Malebranche – 75005 Paris



11 | PRÉFACE

13 | INTRODUCTION



PREMIÈRE PARTIE VOYAGER DANS LE TEMPS OU L'ESPACE



18 | DE L'ASTROCHIMIE À L'EXOBILOGIE
UN FIL DIRECTEUR VERS LA VIE



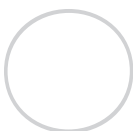
30 | UNE DES GRANDES ÉNIGMES DE LA VIE
VIENT-ELLE DE L'ESPACE INTERSTELLAIRE ?



36 | LES SECRETS DES PLUS VIEUX PARFUMS
DU MONDE



42 | LA VOCATION CHIMIQUE DE MARIE-ANNE
PAULZE (1758-1836)



46 | MYSTÈRES MOLÉCULAIRES AU MUSÉE

53 | L'ANALYSE CHIMIQUE
ÉCLAIRE L'HISTOIRE DE L'ART



59 | JEAN-BAPTISTE DUMAS
ET LE CŒUR EMBAUMÉ DE SAINT LOUIS

63 | UNE BRÈVE HISTOIRE DE L'URÉE
DE SA DÉCOUVERTE À SON DOSAGE

71 | L'ÉPICE DE DUNE
DES MOLÉCULES POUR VOYAGER
DANS LE TEMPS ET L'ESPACE

76 | ALEXENDRE BORODINE
DES NOTES DE MUSIQUE ET DE CHIMIE

80 | DES IMAGES FORTES ET AMBIVALENTES

DEUXIÈME PARTIE
OBSERVER ET PROTÉGER
NOTRE ENVIRONNEMENT

88 | LES SECRETS DÉVOILÉS DES STRATÉGIES
VÉGÉTALES

96 | À LA SURFACE DES OCÉANS

100 | LA CHIMIE DES NUAGES

105 | FACE À UN OCÉAN DE COMPLEXITÉS

110 | DESSALER L'EAU DE MER

114 | PHOTOSYNTHÈSE ARTIFICIELLE
TRANSFORMER LE SOLEIL EN CARBURANTS

118 | CO₂ (MON AMOUR)
UNE INATTENDUE MATIÈRE PREMIÈRE
RENOUVELABLE

122 | HORS DES SENTIERS BATTUS

128 | VALORISER LES DÉCHETS

TROISIÈME PARTIE CRÉER ET STOCKER L'ÉNERGIE

136 | PAS DE CHIMIE... PAS DE BATTERIES !

141 | UN PEU D'EAU DE MER DANS VOTRE
BATTERIE ?

144 | UNE PILE ÉLECTRIQUE QUI FONCTIONNE
À LA SUEUR DE SON PROPRIÉTAIRE

146 | SUPERCONDENSATEURS
LES SPRINTERS DU STOCKAGE DE L'ÉNERGIE

152 | DE L'HYDROGÈNE POUR FAIRE
DE L'ÉLECTRICITÉ

158 | DÉVELOPPEMENTS RÉCENTS
DU PHOTOVOLTAÏQUE
À L'INTERFACE ENTRE ÉLECTRICITÉ
ET LUMIÈRE SOLAIRE

162 | RÉCUPÉRATION DE CHALEUR FATALE
LA CHIMIE AU SERVICE DE LA THERMOÉLECTRICITÉ

168 | JOSEPH LOUIS PROUST
ENTRE MAINE, SEINE ET MANZANARES

172 | DES MOLÉCULES POUR S'ENVOYER EN L'AIR

QUATRIÈME PARTIE MODÉLISER ET CISELER LA MATIÈRE

180 | DE LA PAILLASSE AU SUPERCALCULATEUR

186 | VOIR ET MANIPULER LES MOLÉCULES
DU VIRTUEL AU RÉEL

192 | LA RÉACTION DE GRIGNARD
UNE ÉNIGME DE 120 ANS

198 | DES LOIS FONDAMENTALES, UNIVERSELLES...
ET LA MATIÈRE FUT !

204 | ANGELA MERKEL
PHYSICIENNE, CHIMISTE QUANTICIENNE
ET CHANCELIERE

211 | ALLIAGES À MÉMOIRE DE FORME

215 | LES MATÉRIAUX NANOPOREUX
DE L'UTILITÉ DES TROUS

221 | LA SYNTHÈSE DE NANOMATÉRIAUX
PAR DÉTONATION

CINQUIÈME PARTIE
DIAGNOSTIQUER ET SOIGNER

228 | LE DIAGNOSTIC MÉDICAL AU PIF

233 | DES AGENTS INTELLIGENTS POUR L'IMAGERIE

239 | IRÈNE CURIE
LA RADIOACTIVITÉ DE MÈRE EN FILLE

242 | LA MALADIE D'ALZHEIMER
QUE FONT LES CHIMISTES ?

247 | CONCEVOIR DES NANOMÉDICAMENTS CIBLÉS

252 | PIERRE POTIER
ENTREPRENDRE POUR LA SCIENCE

257 | FAIRE MIEUX AVEC MOINS
LA MICROFLUIDIQUE !

264 | LA CHIMIE INFORMATIQUE
AU SERVICE DES MÉDICAMENTS DE DEMAIN

269 | RÉPARER SON SQUELETTE PAR IMPRESSION
3D ?

SIXIÈME PARTIE CHIMIE AU QUOTIDIEN

276	L'ALCHIMIE PHYSIQUE DU VIN
282	COMMENT ÉVITER QUE LE BOUCHON NE POUSSE SON GOÛT TROP LOIN
285	PRIMO LEVI CHIMISTE ET PHYSICIEN AVANT D'ÊTRE ÉCRIVAIN
289	LES COSMÉTIQUES, CES CONCENTRÉS DE SCIENCE
295	QUAND LES POLYMÈRES IMITENT LA NATURE
302	LA FLUORESCENCE AU SERVICE DE LA POLICE SCIENTIFIQUE
307	MICHEL EUGÈNE CHEVREUL UN SIÈCLE DE LUMIÈRE
311	DÉLICIEUSE CHIMIE
317	GLOSSAIRE
331	POSTFACE
333	REMERCIEMENTS

Préface

***L'étonnement, voilà le secret.
De l'étonnement naît la volonté de comprendre
qui ouvre la voie au progrès de l'humanité.***

Emmanuel Moses

Si vous étiez restés fâchés avec la chimie qui vous a peut-être fait passer des années difficiles à l'école, ce livre va vous réconcilier. Compagne de notre quotidien, la chimie est extrêmement utile, mais aussi promesse d'avenir. Ce livre riche et varié va vous le démontrer.

Déjà, bien avant la formation du Système solaire et de la Terre, la chimie dans le milieu interstellaire a joué un rôle essentiel. Depuis les années 1970, les radiotélescopes ont découvert un grand nombre de molécules organiques dans l'espace. Leur existence même est surprenante, au vu des densités et températures prévalant dans ce milieu étonnant. Et pourtant, toute une chimie en phase gazeuse s'y produit, lentement, par une série de réactions entre les atomes et les ions. Plus de 200 molécules ont ainsi pu être identifiées, comprenant jusqu'à 12 atomes. Des suies, des poussières, voire des molécules contenant plus de 50 atomes de carbone sont aussi observées partout par leur signature infrarouge. Ces poussières sont essentielles car elles catalysent* la formation de l'hydrogène moléculaire H_2 . Les molécules organiques de l'espace ont-elles ensemencé notre atmosphère pour favoriser l'apparition de la vie ? La réponse à cette question est peut-être à chercher dans la chiralité* des molécules du vivant. La lumière polarisée circulairement, fréquente dans l'espace, est-elle à l'origine de la chiralité sur Terre ? La question reste ouverte.

Revenons sur Terre avec Jean Anthelme Brillat-Savarin (1755-1826), avocat-gastronome, auteur du best-seller *La Physiologie du goût* en 1825, qui affirme que « la découverte d'un mets nouveau fait plus pour le genre humain que la découverte d'une étoile ». En effet, la gastronomie, la transformation des aliments, c'est aussi de la chimie... celle qui nous régale ! Pendant longtemps, les bases moléculaires de leur préparation sont restées

incompréhensibles. Des chimistes célèbres se sont penchés sur certains de ces problèmes, comme Antoine Parmentier intrigué par la pomme de terre ou Jean-Antoine Chaptal, père de la chaptalisation *via* le sucrage des moûts, ou encore Louis Pasteur qui montre en 1866 que les levures du raisin sont à l'origine de la fermentation alcoolique. Un étonnant exemple est justement donné par le vin, fabriqué depuis 6 000 ans et que l'on peut clarifier à l'aide de blanc d'œuf battu en neige, les protéines de l'œuf piégeant les excès de tanins.

La santé, elle aussi, a besoin de la chimie. La révolution des nanotechnologies, celle de la nanochimie, permettent aujourd'hui de produire des médicaments de très petite taille qui ne sont plus avalés mais injectés par voie intraveineuse grâce par exemple à une molécule biocompatible*, comme le squalène, lipide naturel, précurseur du cholestérol. Ces technologies apportent les molécules actives spécifiquement sur les tissus cancéreux ou les analgésiques directement sur les centres d'inflammation.

Enfin, la chimie mène à tout. Des chimistes célèbres ont fait une carrière politique, tel François-Vincent Raspail ou, plus près de nous, Margaret Thatcher, premier ministre du Royaume-Uni, voire Chaim Weizmann, premier président d'Israël et père de la fermentation industrielle. L'étonnante Angela Merkel, physico-chimiste et chancelière fédérale d'Allemagne, a même gardé des liens étroits avec le milieu scientifique. D'autres chimistes célèbres deviendront écrivain, comme Primo Levi, ou musicien, comme Alexandre Borodine.

Ce livre, que l'on peut lire par étape et en commençant n'importe où, est constitué d'une cinquantaine de courtes contributions émaillées de biographies inattendues, écrites par des experts. Savoureuses, elles racontent l'histoire des découvertes et parlent de ce qui semble être l'avenir de cette science. Les anecdotes et les illustrations rendent cette étonnante chimie plus familière et le lecteur en ressort avec la certitude d'avoir compris une partie du mystère.

Françoise Combes
Membre de l'Académie des sciences
Médaille d'or CNRS 2020
Prix L'Oréal-Unesco pour les femmes et la science, 2021

Introduction

On ne devrait s'étonner que de pouvoir encore s'étonner

François de La Rochefoucauld

Une science historique comme la chimie pourrait-elle, elle aussi, encore étonner ? Certainement ! Plus innovante que jamais, elle se propose de vous montrer, dans l'ouvrage que vous avez en mains, quelques-unes de ses avancées récentes. Des scientifiques de talent se sont associés dans la présentation d'une cinquantaine d'exemples afin de vous surprendre et de vous faire partager leur passion. Nombre d'objets de la vie quotidienne ou de progrès de la société, voire de grandes avancées scientifiques, sont en effet le résultat d'une chimie bien comprise et bien appliquée. Depuis peu, on sait ainsi réparer un crâne avec une pièce de céramique faite sur mesures par une imprimante 3D ou fabriquer des lunettes à partir de déchets végétaux. Des tissus devenus intelligents aux batteries à l'eau de mer ou aux plastiques recyclables en passant par bien d'autres découvertes inattendues, vous irez de surprise en surprise.

Cet ouvrage présente ainsi les incroyables histoires de découvertes et d'explorations en cours menées par des chimistes dans des domaines aussi variés que le patrimoine, la santé, l'environnement, l'énergie ou, tout simplement, notre vie de tous les jours car la chimie est souvent là où on ne l'attend pas. Vous y découvrirez que :

L'on connaît désormais les secrets des parfums ou des couleurs de l'Antiquité. Sans le savoir, les artistes de la préhistoire utilisaient, pour obtenir une teinte, une stabilité ou un rendu particulier, des formulations élaborées et contrôlaient des réactions chimiques avant même qu'aucun homme ne sache en parler. Depuis, la chimie a permis aux peintres d'élaborer des pigments plus stables ou des vernis plus résistants.

L'on peut détecter certaines pathologies grâce aux odeurs que nous émettons. On peut aussi aujourd'hui alimenter une LED en continu avec sa propre sueur. D'autres contributions liées à la santé vous parleront d'agents d'imagerie et de nano-médicaments, outils précieux pour la détection et le traitement de maladies graves.

La chimie nous aide à préserver notre environnement. En s'inspirant des plantes qui capturent et font réagir le CO_2 avec l'eau pour synthétiser des substances aussi complexes que les sucres ou la lignine du bois, la chimie fait aujourd'hui fonctionner des réactions qui consomment du CO_2 et produisent des molécules qui pourraient un jour se substituer au pétrole.

La chimie est promesse d'énergie propre. Elle aide à transformer l'énergie solaire en électricité puis à l'emmagasiner pour la réutiliser au bon endroit et au bon moment. Les chimistes théoriciens, dont les calculs nous aident à conceptualiser la réaction chimique, n'ont jamais été aussi précieux pour comprendre et améliorer le fonctionnement d'objets bien réels, qu'il s'agisse de batteries, de supercondensateurs ou du solvant plus acteur que spectateur de certaines réactions.

Décidément, la chimie étonne et nous ravit quand elle nous emmène dans les nuages, véritables réacteurs atmosphériques, ou dans l'espace car c'est elle qui fournit les carburants bourrés d'énergie – presque explosifs – pour nous y rendre, ou bien encore qui nous guide dans l'univers de *Dune*...

Toute aussi étonnante est la chimie des vignerons lorsqu'ils surveillent la transformation des sucres des raisins en alcool (et gaz carbonique). Qu'ils soient ardents défenseurs d'une vinification « biologique » ou non, c'est leur connaissance intime de la cinétique chimique qui est mise à contribution... pour notre plus grand plaisir !

Cet ouvrage vous parlera aussi de quelques personnages célèbres, connus comme artistes, politiques ou écrivains mais qui sont également d'éminents chimistes : le nom d'Alexandre Borodine vous est peut-être familier pour son opéra *Le Prince Igor*, mais le connaissiez-vous comme l'auteur d'un ouvrage sur la réaction de dimérisation d'aldéhydes* en aldol ? Saviez-vous que l'écrivain Primo Levi a soutenu sa thèse en 1941 à l'université de Turin, sur l'inversion de Walden ? D'autres parcours vous surprendront bien plus encore.

Si la chimie fait l'objet de recherches très fondamentales visant à comprendre et améliorer les transformations de la matière nécessaires à leurs applications, elle est aussi une industrie, celle qui fabrique l'essentiel des biens et produits de notre quotidien... et dont le devenir est peut-être déjà décrit dans les textes qui suivent.

La chimie est une science de cœur car elle transforme la matière, de l'infime (échelle moléculaire) au macroscopique ; elle occupe aussi une place de choix à l'interface avec la physique, la biologie, l'écologie, les sciences humaines par exemple comme en témoignent les nombreuses avancées décrites au fil de cet ouvrage.

Destiné à *l'honnête homme* avide de belles surprises, ce livre intéressera et distraira curieux et curieuses de tous âges. Il s'adresse aussi, bien sûr, à tous les jeunes gens qui forgent leur culture sur des enseignements fondamentaux, certes, mais aussi sur des exemples qui illustrent si bien le rôle de la science dans le progrès et plus particulièrement celui de la chimie face aux défis qu'affronte notre société.

Cet ouvrage vous surprendra en montrant que la chimie, que vous pensez parfois responsable de pollutions ou tout simplement « contre nature », est bien autre chose, voire le contraire de tout cela. C'est elle qui nous aide à mieux comprendre l'évolution de notre vie, de notre patrimoine, de notre environnement et plus généralement celle du temps qui passe et du monde qui nous entoure.

*Jacques Maddaluno,
directeur de l'Institut de chimie du CNRS.*

*Claire-Marie Pradier,
directrice adjointe scientifique
à l'Institut de chimie du CNRS.*

Mystères moléculaires au musée

Caroline Tokarski et Julie Arslanoglu

***N'importe qui peut rendre le simple compliqué,
la créativité rend le compliqué simple.***

Charles Mingus Jr.

Depuis les prémices de l'art pictural, dès les peintures rupestres de la préhistoire, les artistes ont porté une extrême attention à l'élaboration de leurs peintures, motivés par un impératif technique, un rendu ou un effet. Ils sont ainsi devenus de véritables chimistes et ont à toute époque développé, expérimentalement et empiriquement, de réelles connaissances en formulation* en développant leurs propres supports, leurs propres pigments, leurs propres liants et mélanges. Ces recettes, partagées ou au contraire jalousement gardées, ont permis de faire émerger, en plus des techniques, des effets, des styles, des écoles ou même des mouvements.

Par exemple, Thomas Gainsborough, peintre britannique du XVIII^e siècle, renommé et célébré de son vivant pour ses portraits et ses paysages ruraux, incarne à la perfection l'artiste déterminé à développer sa propre approche de la création artistique. Considéré par beaucoup comme un artiste novateur et expérimental, il crée de véritables « expériences sur papier » dans lesquelles le paysage est essentiel à la création d'effets visuels originaux. Il expérimente et partage les détails de son processus de création dans une lettre adressée à son ami William Jackson en 1773. Il y révèle les secrets de ses huiles sur papier, ses effets picturaux obtenus par le blanc de plomb et partage ses solutions de trempage des feuilles de papier dans du lait pour contrer l'altération des œuvres par l'air encharbonné du Londres du XVIII^e siècle. La description par Gainsborough de sa recette secrète pour préparer ses œuvres se termine par une injonction théâtrale : « *Swear now*

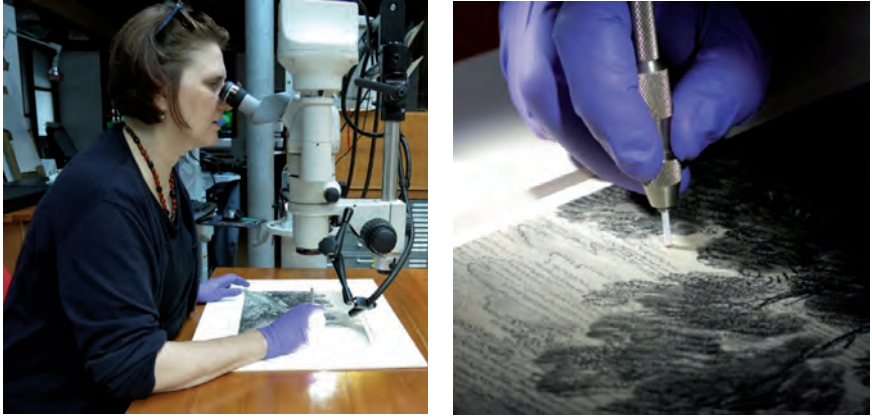


Figure 1 a. Prélèvement micro-invasif sur une œuvre de Th. Gainsborough **b.** Th. Gainsborough (1727-1788) *Hill Landscape with Cows on the Road*, vers 1780, Ill, 62 (photos Reba F. Snyder, conservatrice d'œuvres sur papier et Lindsey Tyne, conservatrice d'œuvres sur papier associée, Thaw Conservation).

never to impart my secret to anyone living»: «Jure maintenant de ne jamais divulguer mon secret à quiconque vit».

Pour vérifier ces écrits historiques et confirmer la spécificité de cette méthode de travail, un nouveau protocole de chimie analytique a pu être proposé [1]. Partant des œuvres du maître, des quantités infinitésimales de matière ont été prélevées mécaniquement, de manière peu invasive, en utilisant des «mini-gommes» (de mini outils abrasifs, **Figure 1**). Ces poussières d'œuvres ont ensuite été solubilisées pour en extraire les biomolécules de liants enfermées dans une matrice de composants organiques et inorganiques. L'analyse de ces protéines se fait grâce à une coupure enzymatique spécifique qui génère des peptides caractéristiques. Ce mélange de peptides est d'abord séparé en phase liquide dans un système nanofluidique à haute pression (pompe nanochromatographique) avant d'être séquencé en phase gazeuse dans un spectromètre de masse (**Figure 2**). De ce flux analytique complexe, dit «analyse protéomique», des protéines de lait d'origine biologique bovine (*Bos taurus*) ont été identifiées, confirmant par l'expérience et à partir des œuvres originales les écrits et les recettes de Gainsborough. Cette expérience introduit la notion de signature moléculaire d'une œuvre d'art, dès lors intimement liée à la signature picturale de l'artiste.

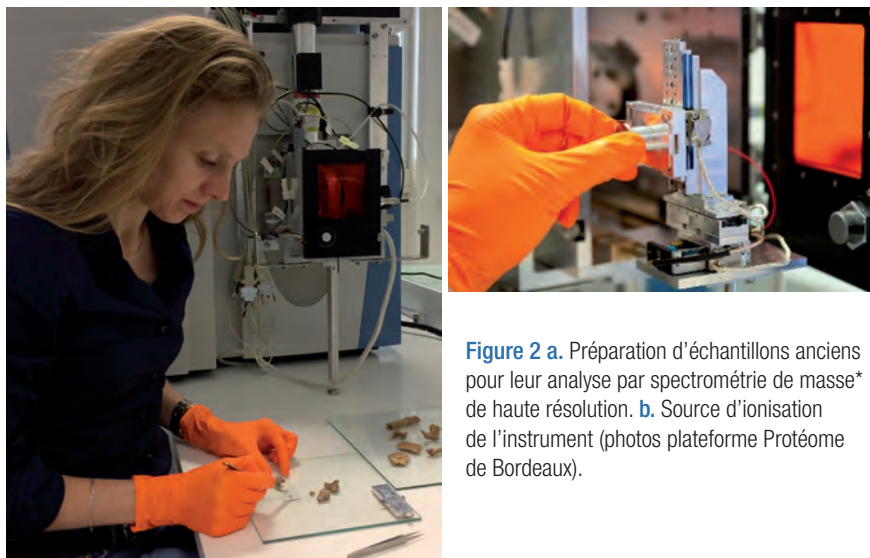


Figure 2 a. Préparation d'échantillons anciens pour leur analyse par spectrométrie de masse* de haute résolution. **b.** Source d'ionisation de l'instrument (photos plateforme Protéome de Bordeaux).



Figure 3. Forts Zeelandia and Provintia and the City of Tainan (清 佚名 台南地區荷蘭城堡), acc. n° 09.3, artiste chinois non identifié, XIX^e siècle (photo The Metropolitan Museum of Art, New York, don J. Pierpont Morgan, 1909).

Les biomolécules constitutives ou rajoutées, identifiées dans les objets d'art, renseignent également sur les lieux de création, sur des points d'histoire ou, indirectement, sur des interactions ou liens sociétaux comme les routes commerciales du passé [2]. Les questionnements autour d'une tenture murale en cuir peint (**Figure 3**), carte illustrée représentant la ville côtière de Tainan (Taïwan) où les Néerlandais avaient construit deux forts vers 1624, en sont un exemple. L'identification des matériaux biologiques et leur provenance (chinoise ou néerlandaise) peuvent informer d'une création locale ou sous influence. Un autre exemple est l'identification de différentes sources de polysaccharides (sucres complexes) dans des tissus égyptiens peints à la fin du II^e ou du début du III^e siècle (**Figure 4**): la présence de certains sucres contredit l'hypothèse selon laquelle les Égyptiens de l'Antiquité n'utilisaient que la gomme locale et de plus grande pureté d'*Acacia Senegal*, et ouvre une discussion quant aux routes commerciales dans l'Égypte ancienne.



Figure 4. Fragment d'un linceul de momie peint, acc. n° X.390, Égyptien Romain : fin II^e-III^e siècle A.D., Museum Accession (photo The Metropolitan Museum of Art, New York).

La signature moléculaire renseigne également sur le chemin parcouru par les œuvres depuis leur création. Les conditions ou les traitements de conservation sont ainsi accessibles grâce aux outils de chimie analytique. L'étude entreprise sur les manuscrits coptes en est un parfait exemple. Les parchemins sahidiques étudiés, découverts en 1910 dans le Fayoum (Égypte), ont d'abord été conservés au Vatican. Afin de mieux comprendre leur état de conservation actuel (**Figure 5**), une analyse du matériel organique constituant ces parchemins exceptionnels et leurs éventuels



Figure 5

a. *Homily on Gilead* (*Homélie sur le comportement chrétien*), Égypte, vers 822-914, MS M.604, p. 1 verso et p. 2 recto. Morgan Library & Museum, New York, achat par J. Pierpont Morgan en 1911. Thaw Conservation Center, Sherman Fairchild, à gauche, et Frank Trujillo, conservateur de manuscrits, Drue Heinz, à droite (photo Maria Fredericks, directrice de la conservation).

b. *Martyrdom of St. Pteleme* (*Le martyre de saint Ptolémée*), Égypte, x^e siècle-début x^e siècle, MS M.581, p. 3 recto. Morgan Library & Museum, New York, achat par J. Pierpont Morgan en 1911 et 1912 (photo Federica Pozzi, chercheur associé, Network Initiative for Conservation Science (NICS), Département de Recherche Scientifique, The Metropolitan Museum of Art, New York).

matériaux de conservation a été initiée. Un travail de décodage chimique du réseau macromoléculaire organique formé *in situ* par les protéines et l'identification de pontage au formaldéhyde, a permis d'élucider une recette de restauration mise en œuvre par le Vatican, laquelle n'avait jusque-là jamais été révélée.

Les biomolécules constitutives des matériaux d'art détiennent les secrets de fabrication d'une œuvre, de son apparence actuelle, de son évolution au fil du temps et de son apparence future. Comprendre ces recettes complexes et leurs interactions chimiques donne des indices sur des questions allant de l'importance de la sélection des matériaux par les artistes jusqu'aux interactions entre cultures et peut même aider à appréhender la fragilité

des objets. Des développements inédits et sans précédent en spectrométrie de masse nous permettent d'investiguer, d'enrichir nos connaissances et de faire de nous de meilleurs gardiens de notre patrimoine culturel.

Partenariat et remerciements

Les études ont été réalisées en partenariat avec Federica Pozzi, Network Initiative for Conservation Science (NICS), Département de Recherche Scientifique, The Metropolitan Museum of Art, New York.

L'étude des manuscrits Coptes a été réalisée en partenariat avec Maria Fredericks et Frank Trujillo, Thaw Conservation Center, The Morgan Library & Museum, New York.

L'étude des œuvres de Gainsborough a été réalisée en partenariat avec Reba F. Snyder et Lindsey Tyne, Thaw Conservation Center, The Morgan Library & Museum, New York.

L'analyse par spectrométrie de masse des manuscrits coptes et les œuvres de Gainsborough a été réalisée dans le cadre de la thèse de doctorat de Francesca Galluzzi (2017-2020), Institut de chimie & biologie des membranes & nano-objets, UMR CNRS 5248, Plateforme Protéome, université de Bordeaux, Bordeaux.

L'étude du cuir peint a été réalisée en partenariat avec Mike Hearn, Joseph Scheier-Dolberg, Jennifer Perry et Hwai-ling Yeh-Lewis, Département d'Art Asiatique, The Metropolitan Museum of Art, New York.

L'étude du textile égyptien a été réalisée en partenariat avec Christopher Lightfoot, Seán Hemingway, Département d'Art Grec et Romain, The Metropolitan Museum of Art, New York et Emilia Cortes, Département de Conservation du Textile, The Metropolitan Museum of Art, New York. L'analyse des peintures Égyptiennes a été réalisée par Clara Granzotto, Département de Recherche Scientifique, The Metropolitan Museum of Art, New York (Mellon Fellow 2016-2018; actuellement, Art Institute of Chicago).

Références

1. POZZI F., ARSLANOGLU J., GALLUZZI F., TOKARSKI C., SNYDER R., « Mixing, dipping, and fixing: the experimental drawing techniques of Thomas Gainsborough », *Heritage Science*, 2020, 8:85.
2. DALLONGEVILLE S., GARNIER N., ROLANDO C., TOKARSKI C., « Proteins in Art, Archaeology, and Paleontology: From Detection to Identification », *Chemical Reviews* 2016, 116, 1, 2-79.

La chimie des nuages

Anne Marie Delort

*Les nuages sont comme les pensées,
les rêveries, les cauchemars du ciel.*

Jules Renard

Longtemps considérés par les hommes comme le domaine des dieux puis comme des objets esthétiques, les nuages n'ont été étudiés scientifiquement qu'à partir du XIX^e siècle. S'ils font encore rêver, on sait désormais que ce sont également d'immenses réacteurs, sièges de très nombreuses réactions chimiques. Le nuage est un milieu complexe : il contient à la fois une phase gazeuse (air) et une phase liquide (gouttelettes d'eau) (**Figure 1**). De très nombreux composés chimiques sont présents

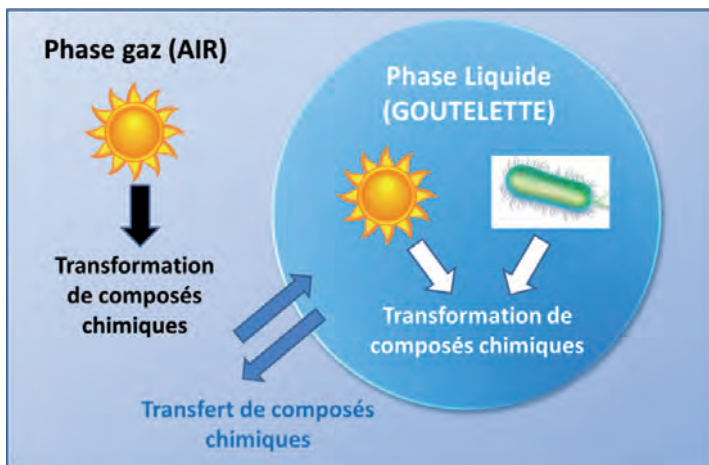


Figure 1 Schéma simplifié de la chimie du nuage. Les composés chimiques sont transformés grâce à la lumière solaire dans la phase gazeuse (air) et la phase liquide (gouttelette), et peuvent passer d'une phase à l'autre. Les micro-organismes peuvent aussi transformer ces composés dans la phase liquide.

dans les deux phases, ces molécules étant émises directement depuis le sol à partir de sources naturelles (végétation, volcans, océans...) ou de sources anthropiques (industries, agriculture, feux de cheminée...). Ces molécules chimiques peuvent également être transformées dans la phase gazeuse et/ou la phase aqueuse et peuvent être transférées d'une phase à l'autre.

Jusqu'à une période récente, il était admis que ces transformations chimiques étaient principalement induites par la lumière solaire qui favorise la production de radicaux, qui sont des espèces chimiques extrêmement réactives. Le radical hydroxyle ($\text{OH}\cdot$), souvent nommé «le détergent de l'atmosphère», est le principal acteur de cette chimie des nuages. La plupart des réactions chimiques conduisent à la formation de molécules de plus en plus petites et de plus en plus oxygénées, jusqu'au CO_2 . D'autres réactions conduisent à la formation d'oligomères*, qui sont des molécules plus longues aux motifs répétés.

Bien que de très nombreuses équipes travaillent depuis longtemps à décrire la chimie des nuages, il est encore aujourd'hui très difficile de représenter dans le détail toutes les réactions qui interviennent, d'autant que 80 % des composés présents dans sa phase aqueuse demeurent inconnus. La situation s'est encore complexifiée lorsque l'on a découvert dans les gouttelettes de nuage, il y a une quinzaine d'années seulement, la présence de micro-organismes (bactéries, levures, champignons) vivants, qui peuvent potentiellement participer à la transformation des molécules chimiques [1].

Les micro-organismes sont émis dans l'air à partir de la surface terrestre (océans, sols, végétation). Le vent joue un grand rôle dans cette émission, par exemple en soulevant des poussières ou créant des embruns marins, ce qui favorise leur aérosolisation. Ces micro-organismes voyagent dans l'atmosphère pendant 1 à 10 jours avant de retomber sur le sol au sein de dépôts secs ou de précipitations. Si les conditions le permettent (température, pression, humidité), ils peuvent également condenser de l'eau à leur surface et devenir eux-mêmes des gouttelettes de nuage, dont la collecte permet de les mettre en évidence, de les identifier, de les cultiver et de les étudier pour évaluer leur influence sur la chimie du nuage (**Figure 2**).

Un micro-organisme, comme tout être vivant, peut transformer des molécules grâce à ses enzymes*, des protéines qui jouent le rôle de catalyseur* chimique (on parle de «biocatalyseur»). Ce sont par exemple les enzymes du corps humain qui décomposent les molécules complexes présentes dans la nourriture (protéines, glucides, lipides) en petites molécules (sucres, acides aminés, acides carboxyliques*) qui sont à leur tour transformées par



Figure 2 Collecte de manière stérile de l'eau des nuages à l'Observatoire du Globe de Clermont-Ferrand, au sommet du puy de Dôme (1 465 m) grâce à un « aspirateur à nuage ». Cette eau est mise en culture dans des boîtes de Petri où les micro-organismes se développent en formant des colonies plus ou moins colorées. Plus de 1 000 micro-organismes ont été identifiés et sont conservés à l'Institut de Chimie de Clermont-Ferrand, ce qui constitue une collection unique au monde.

d'autres enzymes jusqu'à la production de CO_2 ou de biomasse. Il est désormais établi que les micro-organismes des nuages peuvent utiliser certaines molécules présentes dans l'eau atmosphérique comme source de carbone et conduire également à la formation de CO_2 ou de biomasse.

Les premières études relatives à l'action de ces micro-organismes ont été focalisées sur les principaux composés présents dans l'eau des nuages : formaldéhyde, méthanol, acides carboxyliques (formiate, acétate, oxalate, succinate, malonate). Les voies de biotransformation de ces composés (appelées « voies métaboliques ») sont souvent très proches

des voies de transformation observées sous l'influence du rayonnement solaire (photo-transformation). Elles aboutissent aux mêmes intermédiaires chimiques et *in fine* à la production de CO_2 . Par exemple, la chaîne de transformation des composés comportant un seul atome de carbone est présentée dans la **Figure 3**. Il a également été montré que ces micro-organismes peuvent transformer le peroxyde* d'hydrogène (H_2O_2) en eau et oxygène [2, 3]. Cette observation est importante car H_2O_2 est la principale source du radical hydroxyle à l'origine de la chimie radicalaire dans les nuages. Les micro-organismes peuvent donc réduire l'influence de cette voie de réaction chimique.

Il est très important de connaître l'influence relative des voies biologiques et photochimiques pour comprendre l'ensemble des réactions chimiques présentes dans les nuages et leurs interactions. Grâce à des expériences réalisées en laboratoire dans des «photo-bioréacteurs» il est possible de bien simuler les températures basses et la lumière solaire que l'on rencontre au sein des nuages. Les mesures des vitesses de biodégradation et de photodégradation des molécules sont réalisées, soit avec des micro-organismes provenant des nuages puis introduits dans un milieu de type nuage «artificiel» ayant une composition simplifiée, soit avec des échantillons

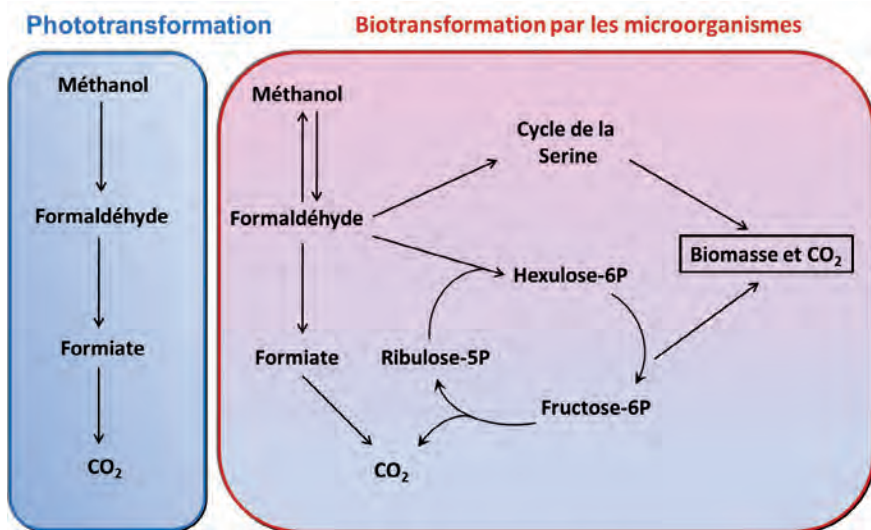


Figure 3 Similitude entre les voies de photo- et de bio-transformation de molécules contenant un seul carbone (méthanol, formaldéhyde et formiate).

d'eau provenant de nuage, seuls échantillons représentatifs de la complexité de ces milieux en termes de biodiversité et de composition chimique. On a ainsi montré dans ces conditions expérimentales, que les vitesses de bio- et de photo-transformation sont du même ordre de grandeur et qu'elles sont donc en compétition. Des études similaires appliquées à la transformation de polluants atmosphériques tels que le phénol qui est très toxique, révèlent également des vitesses de bio- et photo-transformation comparables.

Ainsi, en plus des transformations purement photochimiques, les processus chimiques réalisés par les micro-organismes peuvent contribuer de manière significative à la transformation des composés présents dans la phase aqueuse des nuages. Cependant, quels que soient la rigueur et le soin apportés aux expériences menées en laboratoire, elles ne peuvent représenter parfaitement les mécanismes complexes qui interviennent dans les nuages, qui sont constitués d'une multitude de gouttelettes liquides de tailles variables, autant de petits réacteurs chimiques en interaction avec l'air environnant. De surcroît, en raison de la diversité des types de nuage, de leur dynamique, et de la météorologie, une très grande variété de processus chimiques peut contribuer à la transformation des molécules en leur sein. Seuls des modèles numériques de simulation seraient actuellement en mesure de quantifier l'influence relative des mécanismes de biodégradation par rapport aux autres. Cependant, aucun des modèles actuels de chimie atmosphérique ne prend en compte les processus biologiques. Intégrer la biologie dans ces modèles est donc un enjeu majeur pour les années à venir.

Au-delà d'un besoin de connaissance fondamentale de la chimie dans les nuages, leur compréhension doit contribuer à mieux diagnostiquer la qualité de l'air et mieux prédire l'évolution du climat.

Références

1. DELORT A.-M., VAITILINGOM M., AMATO P., SANCELME M., PARAZOLS M., LAJ P., MAILHOT G., DEGUILLAUME L., « A short overview of the microbial population in clouds: potential roles in atmospheric chemistry and nucleation processes », *Atmospheric Research*, 2010, 98, p. 249-260.
2. VAITILINGOM M., DEGUILLAUME L., VINATIER V., SANCELME M., AMATO P., CHAUMERLIAC N., DELORT A.-M., « Potential impact of microbial activity on the oxidant capacity and organic carbon budget in clouds », *Proceedings of the National Academy of Science USA*, 2013, 110, p. 559-564.
3. DELORT A.-M., DEGUILLAUME L., MAILHOT G., « Les micro-organismes, acteurs de la chimie des nuages ? », *Actualité chimique*, 2015, 395, p. 14-17.

Postface

Tout est beau dans ce qui se dévoile.

Homère, *Iliade* (xxii, 73)

Dans son livre *Le jeu des possibles* (1981), François Jacob¹ mentionnait que «Le début de la science moderne date du moment où aux questions générales se sont substituées des questions limitées; où au lieu de demander: “Comment l’univers a-t-il été créé? De quoi est faite la matière? Quelle est l’essence de la vie?”, on a commencé à se demander: “Comment tombe une pierre? Comment l’eau coule-t-elle dans un tube? Quel est le cours du sang dans le corps?”. Ce changement a eu un résultat surprenant. Alors que les questions générales ne recevaient que des réponses limitées, les questions limitées se trouvèrent conduire à des réponses de plus en plus générales.»

Nous espérons que les «questions limitées» traitées dans cet ouvrage vous auront fait découvrir ou redécouvrir une science qui, dans sa pratique, figure parmi les plus anciennes mais dont la rationalisation systématique entamée à la fin du XVIII^e siècle, après des siècles de tâtonnements empiriques, a conduit à une accélération du développement stupéfiante et continue depuis 200 ans.

Certes les innovations de la chimie ou d’une manière générale de la science peuvent servir au meilleur comme au pire, et le mal peut même dans certains cas être la conséquence d’actions initialement mises en œuvre pour le bien de l’humanité. Cependant, l’objet de la chimie étant la connaissance de l’association des atomes pour constituer des molécules, des liquides ou des

1. En 1965, François Jacob (1920 – 2013) partage avec André Lwoff et Jacques Monod le prix Nobel de physiologie/médecine «pour leurs découvertes concernant le contrôle génétique des synthèses enzymatiques et virales». Il fut élu à l’Académie des sciences en 1977 et reçu à l’Académie française en 1997, Maurice Schumann, un frère d’arme, y prononçant le discours de réception. Il est le père d’Odile, la fondatrice des éditions Odile Jacob, spécialisées dans la vulgarisation scientifique.

solides et le réarrangement de ces atomes au sein de réactions, cette science éclaire sur tout ce qui nous environne, vivant ou non. Les exemples choisis ont vocation à vous communiquer le plaisir de cette compréhension. Il y a toujours une part subjective dans un choix et une sélection différente de textes et d'auteurs aurait sans doute éclairé d'autres pans de la chimie, ce sera sans doute l'objet d'autres ouvrages.

Si celui-ci peut éclairer, réconcilier ou peut-être même susciter des vocations, le but sera atteint. Les chimistes, tous, sont d'une imagination fertile, qu'ils soient devant la paillasse ou devant leurs équations. Il n'est guère de doute qu'au-delà des thématiques abordées dans les pages précédentes, l'aventure chimique continuera, portée par les futures générations sensibilisées aux besoins et conscientes d'éviter les maux discordants.

Merci à l'ensemble des auteurs qui se sont livrés avec un enthousiasme partagé, parfois avec une pointe d'autodérision mais toujours avec une extrême rigueur scientifique, à un exercice d'écriture particulièrement difficile : ce sont les acteurs qui, au quotidien et grâce à leur inventivité et savoir-faire, font avancer une chimie qui n'a pas fini d'étonner.

*Olivier Parisel & Francis Teyssandier
Paris & Perpignan, le 22 février 2021*

Étonnante chimie

Découvertes et promesses du xxi^{e} siècle

La chimie n'a jamais été aussi présente dans notre quotidien, et notre avenir rarement aussi dépendant de ses développements. Transformer le CO_2 en carburant vert, reproduire des organes par impression 3D, élaborer des molécules visant à mieux soigner des pathologies : les routes que pourrait suivre notre futur se découvrent à travers la cinquantaine de petites histoires étonnantes qui vous sont proposées dans ce livre.

Vous lirez aussi que certains chimistes sont mieux connus pour d'autres activités : vous doutiez-vous que l'écrivain Primo Levi, le musicien Borodine, ou encore la chancelière Angela Merkel étaient aussi des chimistes de talent ?

Cet ouvrage rassemble les contributions de dizaines de scientifiques, femmes et hommes qui, enthousiastes, mènent des recherches de pointe un peu partout en France. Leurs récits surprenants vous mèneront de la chimie des océans à celle des nuages, au sein même des molécules. Parfums de l'Antiquité, secrets de nos grands peintres, arômes des vins ou de la cuisine : la chimie est également à la source de grands et petits plaisirs.

Préparez-vous à un voyage inattendu, au cœur de la matière et de ses transformations.

« Cet ouvrage permet d'aller au-delà des lieux communs.

Parce qu'elle transforme la matière qui nous entoure, la chimie intéresse chacun et chacune d'entre nous. Le CNRS, seul organisme de recherche national à disposer d'un institut qui lui soit consacré, s'en réjouit et place la chimie au centre de son action interdisciplinaire.

En lisant ce livre, vous comprendrez pourquoi ! »

Antoine Petit, président-directeur général du CNRS

22 € prix valable en France
ISBN : 978-2-271-13652-7



9 782271 136527

 UN LIVRE A
LE MÊME PRIX
PARTOUT

www.cnrseditions.fr

Cristaux de carbonate de calcium
(CaCO_3) de formes cubique,
hexagonale et en aiguille,
imbriqués les uns dans les autres.
Photo Bertrand REBIERE / ICGM /
CNRS Photothèque.

Maquette :  SYLVAIN COLLET