

Colorants biosources pour une industrie de la couleur textile plus verte : cas de la synthèse enzymatique pili©

Biosource dyes and pigments for a greener textile color industry: case of pili© enzymatic synthesis.

Estelle Guerry¹, Léa Diaz²

¹ Université de Toulouse, Laboratoire LARA-SEPPIA, France, eguerry.contact@gmail.com

² Université de Pau et des Pays de l'Adour, E2S UPPA, CNRS-UMR 5254, IPREM, Mont de Marsan, France, lea.diaz@sfr.fr

RÉSUMÉ. Ce papier porte sur le procédé biotechnologique développé par l'entreprise PILI©, la synthèse enzymatique à partir de carbone renouvelable pour la production de molécules colorantes. Ce procédé innovant permet la production de colorants biosourcés, visant la réduction de l'empreinte environnementale de l'industrie de la couleur. Reposant sur les biotechnologies et des procédés hybrides alliant fermentation industrielle et chimie verte, l'entreprise produit aujourd'hui des gammes de couleurs performantes dédiées aux applications les plus polluantes : textiles, encres, polymères, peintures et revêtements. L'étude repose sur une revue de la littérature qui a permis d'établir un diagnostic des dernières innovation dans l'industrie textile française et la production de colorants biosourcés, identifiant ainsi le procédé développé par l'entreprise PILI© et de déterminer les freins, leviers et perspectives applicatives du procédé développé.

ABSTRACT. This paper deals with the biotechnological process developed by the company PILI©, the enzymatic synthesis from renewable carbon for the production of dye molecules. This innovative process allows the production of biologically based dyes and aims to reduce the environmental footprint of the dye industry. Based on biotechnology and hybrid processes combining industrial fermentation and green chemistry, the company now produces a range of high-performance dyes for the most polluting applications: Textiles, inks, polymers, paints and coatings. The study is based on a literature review that made it possible to diagnose recent innovations in the French textile industry and the production of bio-based dyes, thus identifying the process developed by the company PILI© and determining the obstacles, levers and application prospects of the developed process.

MOTS-CLÉS. innovation, savoir-faire, biotechnologie, biomatériaux, molécules colorantes.

KEYWORDS. innovation, know-how, biotechnology, biomaterials, dye molecules.

1. Introduction

L'industrie de la coloration est l'une des plus nocives pour l'environnement, 99% des colorants sont fabriquées à partir de ressources fossiles [HAS 17a]. Le secteur textile est le plus grand consommateur de colorants, utilisant chaque année près de 7 millions de tonnes de ces substances [OGU 11]. Les colorants dérivés du pétrole ont été largement utilisés jusqu'à récemment en raison de leur faible coût et de leur performance élevée, résistant à la décoloration lors de l'exposition à la sueur, à la lumière, à l'eau, à de nombreux produits chimiques, y compris les agents oxydants, et aux attaques microbiennes. Les colorants

synthétiques fournissent également une large gamme de teintes, ils présentent un profil de résistance à l'humidité élevé, une grande facilité d'application et la possibilité d'obtenir des couleurs brillantes résistantes à l'usure [WAN 09]. Mais pour obtenir un tel résultat, la production de 1 Kg de colorant pétrochimique requiert l'utilisation de 100 Kg de pétrole, 10 Kg de produits chimiques toxiques, une importante quantité d'énergie pour le chauffage à haute température et 1 000 L d'eau, les produits textiles étant généralement teints par des colorants dissous ou dispersés dans l'eau, étape appelée bain de teinture, suivie d'une étape de rinçage [KHA 14]. Les problèmes de pollution liés à la production de ces colorants n'ont commencé à être pris au sérieux que très récemment. Cette prise de conscience met au jour le fait que certaines industries, notamment le secteur textile, sont à la fois très polluantes et néfastes, tant pour les travailleurs que pour la population¹. Les grandes quantités d'eau nécessaires au procédé de fabrication précédemment évoqué, se chargent en effet de colorants non fixés sur les tissus qui se retrouvent en fortes concentrations dans les effluents textiles [HAS 17b], ainsi que d'additifs chimiques avant d'être expulsés sous forme d'eaux usées qui, à leur tour, polluent l'environnement par la chaleur des effluents, par un pH élevé et par la saturation de colorants, d'agents anti-mousse, d'agents de blanchiment, de détergents, d'azurants optiques, d'égaliseurs et de nombreux autres produits chimiques utilisés au cours du processus [HOL 16] [JUA 96]. La quantité d'eau consommée et rejetée varie également en fonction du type de tissus produits [ANA 12]. Presque 0,08 – 0,15 m³ d'eau est utilisée pour produire un kilogramme de tissu. On estime qu'environ 1 000 à 3 000 m³ d'eau sont évacués après le traitement d'environ 12 à 20 tonnes de textiles par jour [AIK 04]. Ces effluents sont donc riches en colorants et produits chimiques dont certains sont non biodégradables, cancérigènes et constituant une menace majeure pour l'environnement et la santé [ACU 04].

Concernant l'impact sanitaire des colorants, les dangers les plus courants liés aux colorants réactifs sont les problèmes respiratoires dus à l'inhalation de particules de colorants. Parfois, ils peuvent affecter le système immunitaire d'une personne et, dans des cas extrêmes, le corps peut réagir de façon spectaculaire. C'est ce qu'on appelle la sensibilisation respiratoire. Les symptômes comprennent des démangeaisons, des yeux larmoyants, des éternuements et des signes d'asthme tels que la toux et une respiration sifflante [HAS 16]. Les problèmes de santé les plus prédominants liés aux processus de teinture et de finition proviennent peut-être de l'exposition à des produits chimiques agissant comme des irritants. Ceux-ci peuvent provoquer une irritation de la peau, des démangeaisons ou un nez bouché, des éternuements et des yeux douloureux. En effet, les colorations comprennent des résines à base de formaldéhyde ; de l'ammoniac ; de l'acide acétique ; certains produits chimiques anti-rétrécissement ; certains azurants optiques comme le carbonate de soude, la soude caustique ou l'eau de Javel. Certains colorants réactif de cuve, qui ensuite se dispersent, sont également reconnus comme sensibles pour la peau [HSE n/a].

¹ Le 24 avril 2013, dans la périphérie de Dacca (Bangladesh), un événement tragique a eu lieu au Rana Plaza, entraînant de lourdes conséquences liées à la mondialisation de l'industrie textile. Cet immeuble, qui hébergeait des centaines d'ouvriers du textile, était adjacent à d'autres sweatshops où des accidents se produisaient régulièrement. Entre 2009 et 2012, selon le *Bangladesh Institute of Labour Studies*, plus de 700 personnes sont décédées au travail dans des usines textiles. Le Bangladesh est devenu le deuxième exportateur mondial de textiles, après la Chine et devant l'Inde, en employant des mères célibataires, des veuves, des femmes répudiées et de nombreux enfants, pour des salaires dérisoires et dans des conditions de travail relevant du travail forcé [FUM 13].

Il apparaît donc crucial de trouver des solutions saines et plus écologiques pour la production de colorants. C'est pourquoi, depuis plusieurs années, les colorants végétaux ont été envisagés comme une alternative. Mais leur coût élevé et leur faible performance les ont empêchés d'être utilisés, jusqu'à aujourd'hui, à grande échelle [GAN 09]. En effet, l'extraction des matières premières dites naturelles prend du temps et la disponibilité des colorants naturels est limitée et très réglementée. De plus, les colorants naturels étant principalement extraits de plantes, ils dépendent des saisons de croissance contrairement aux colorants synthétiques produits en laboratoires. De plus, même si les colorants naturels produisent des couleurs vives et une variété de nuances, ils ont tendance à s'estomper plus rapidement que les colorants synthétiques. La cohérence chromatique est un problème. Il n'y a pas deux lots de teinture identiques en raison des impuretés qu'ils contiennent. Les fibres synthétiques, actuellement très populaires, ne peuvent pas être totalement fiables lorsque teintées avec des colorants naturels [TAY 08]. Enfin, certains mordants utilisés avec des colorants naturels peuvent eux-aussi être toxiques dans une certaine mesure. Quand bien même les fibres telles que la soie et la laine peuvent être teintées en les trempant directement dans un bain de teinture, d'autres matériaux comme le coton nécessitent un mordant. Une attention particulière et chronophage (difficile pour l'industrie de masse) est donc nécessaire pour pratiquer les teintures « saines ». Depuis quelques années, des recherches prometteuses concernant les couleurs et le développement de bio-mordant ont vu le jour afin de procéder à un pré-mordantage du substrat. Reste que les sources utilisées ne permettent pas la stabilisation de tous les colorants, réduisant alors la palette possible de couleurs [BAS 22]. Ces initiatives sont néanmoins prometteuses à l'heure où il est impératif d'envisager de nouveaux procédés de fabrication de colorants textiles qui soient plus respectueux des considérations sanitaires et environnementales, tout en répondant aux exigences de la production de masse que nous connaissons actuellement.

2. Matériel et méthode

Pour identifier les dernières innovations dans l'industrie textile française et la production de colorants biosourcés, la présente démarche a procédé à une revue de la littérature. Conduite manuellement, elle n'a fait l'objet d'aucune restriction langagière sur une période de 5 ans (2018 - 2023). Elle a été conduite dans un premier temps à partir de la base de données numérique Google Scholar, qui référence l'intégralité du contenu des principales bases de données scientifiques et académiques. Les mots-clés utilisés étaient : « colorant », « biosourcés », « industrie textile ». 3010 résultats ont été obtenus. Les articles dont les titres ne se référaient pas explicitement au sujet n'ont pas été retenus. Les *abstracts* des articles restants (96 résultats) ont été lus pour s'assurer qu'ils traitaient pleinement de la problématique ciblée. Mais ce ne fut le cas d'aucun d'entre eux car tous n'abordaient la problématique que partiellement. Au regard de ce constat, la recherche a été complétée par une recherche manuelle sur le moteur de recherche généraliste Google. Du fait du nombre conséquent de résultats (approximativement 7500 résultats), seuls les 150 premiers ont été examinés en raison de leur degré de pertinence. Chaque source sélectionnée (57 résultats) a fait l'objet d'une lecture approfondie pour identifier celles qui traitaient véritablement du sujet de cette étude (12 résultats).

3. Résultats et discussion

Il s'est avéré que les sources sélectionnées traitaient presque exclusivement d'un procédé développé par une jeune entreprise française : l'entreprise PILI[®]. L'étude s'est donc centrée sur l'identification de ce procédé, de ses freins, leviers et de ses perspectives applicatives.

3.1. Procédé de fabrication

La société PILI[®], *usines cellulaires de la couleur*, est à l'avant-garde du développement biochimique et se consacre au développement d'un procédé basé sur la synthèse enzymatique, exploitant des protéines puissantes qui catalysent la plupart des réactions biologiques se produisant chez tous les êtres vivants [BOI 23]. Basé à la TWB, Toulouse White Biotechnology (Toulouse, France), l'équipe conçoit des microorganismes et développe des méthodologies de synthèse et d'extraction durables. De plus, PILI[®] teste les propriétés de ses colorants issus de sources biologiques en partenariat avec le CNAM (Paris, France) et a implanté son premier site de production pilote à Roussillon, en Isère [PIL 22a].

Les colorants sont produits grâce à l'exploitation de nouvelles compétences développées à l'aide des techniques de pointe de la biologie de synthèse, en s'inspirant d'un processus de fermentation. Ce procédé historique est couramment utilisé dans la production à grande échelle d'autres composés, tels que l'insuline dans l'industrie pharmaceutique par exemple [COR 23]. Le procédé développé repose plus spécifiquement sur la conception de cascades enzymatiques pour obtenir des molécules colorantes à partir de sources de carbone renouvelable, tels que le sucre, les déchets agricoles et d'autres nutriments. Les premières souches utilisent comme matière première le sucre ; sucre produit chaque année naturellement par les plantes contrairement à d'autres composés comme le pétrole. Pour reproduire ce processus à grande échelle, les enzymes sont intégrées à des microorganismes telles que les bactéries. Ces microorganismes se développent dans de l'eau à température ambiante, utilisent le sucre comme matière première renouvelable et ne génèrent aucun sous-produit polluant. Les bactéries sont des "bio-fabriques" puissantes, car elles sont extrêmement efficaces chromatiquement sans causer de pollution [HOL 16]. Des recherches sont actuellement menées pour permettre aux microorganismes d'utiliser directement les déchets agricoles comme matière première [GLO 23]. C'est pourquoi la démarche permet la classification des colorants PILI[®] comme étant biosourcés². Ces derniers ne nécessitent ni pétrole ni produits chimiques et requièrent environ cinq fois moins d'eau et beaucoup moins d'énergie grâce à la production à température ambiante [KAT 80]. Ce n'est pas seulement un modèle efficace et durable, il permet également la production d'une large palette chromatique (fig. 1), qui comporte à ce jour plus d'une centaines de couleurs [FOR 20]. Le cas PILI[®] peut être mis en œuvre à grande échelle [GLO 23] et démontre qu'esthétique et résistance chromatique sont possibles *via* de nouvelles voies de production et de coloration.

² Le développement des colorants PILI[®] s'inscrit dans la mouvance de la chimie biosourcée en ayant recours à des matières premières issues de la biomasse végétale qui permettent de remplacer, partiellement ou en intégralité, les ressources fossiles (ici, plantes sucrières et déchets agricoles). Les produits finaux sont alors dénommés « biosourcés » dans la mesure où ils sont proviennent de cette biomasse. Elle offre à l'industrie de nouvelles opportunités pour répondre aux enjeux actuels et futurs de développement durable et de sûreté environnementale et sanitaire [APP 13].



Figure 1. Gamme initiale de couleurs PILI® (2017).

Les microorganismes reproduisent tout le savoir-faire acquis pour la production de molécules colorantes au fur et à mesure de leur reproduction. La duplication est très rapide et permet de formuler certaines couleurs capables de se reproduire toutes les 20 minutes. En une journée, il est possible d'observer des milliards de microorganismes, chacun produisant les molécules colorantes souhaitées. Une fois le processus terminé, les bactéries sont séparées des molécules colorantes par filtration, puis purifiées en les isolant des résidus du milieu de culture [HOL 16].

3.2. *Bénéfices environnementaux et sanitaires*

La synthèse enzymatique offre de nombreux avantages pour la production de biomatériaux, notamment par son efficacité énergétique remarquable et sa spécificité élevée dans la production de molécules. Elle constitue une alternative biosourcée aux molécules dérivées des sources fossiles, animales ou végétales [HSU 18]. Les colorants développés par la jeune entreprise PILI® présentent ainsi des bénéfices environnementaux supérieurs à ceux des colorants pétrochimiques classiques. Le processus de production mis en place est nettement plus respectueux de l'environnement, comme mentionné précédemment. De plus, ces colorants offrent des avantages pour la santé car ils ne contiennent pas de PCA³ (parachloro-aniline), substances fortement suspectées d'implications sanitaires liées aux colorants textiles. Les produits PILI® sont conformes aux réglementations européennes (REACH⁴) et ne présentent aucun risque sanitaire pour les utilisations auxquelles ils sont destinés [LAN 19]. À quand pour les marchés ?

3.3. *Perspectives*

Grâce à l'utilisation spécifique et efficace des enzymes, l'entreprise se consacre au développement de colorants adaptés non seulement à l'industrie textile, mais aussi à d'autres domaines d'application spécifiques. Toutefois, étant donné que l'industrie textile est le plus gros consommateur de colorants et que c'est le deuxième secteur le plus polluant après

³ La parachloroaniline (PCA) est une substance utilisée dans la fabrication de teintures rouges et oranges par l'industrie textile. Cette substance est classée comme cancérigène, toxique en cas d'ingestion, de contact avec la peau, d'inhalation et présente une toxicité aiguë pour les organismes aquatiques en cas de pollution des cours d'eau [ECH 23].

⁴ La réglementation REACH (règlement n°1907/2006) est une législation de 2007 visant la sécurité de la fabrication et de l'utilisation des substances chimiques dans l'industrie européenne. Les objectifs de REACH sont les suivants : protéger la santé humaine et l'environnement contre les risques potentiels des substances chimiques, assurer une information cohérente et transparente sur la nature et les risques des substances, qu'elles soient utilisées seules ou dans des mélanges, du fournisseur jusqu'au client final, garantir une manipulation sécurisée des substances chimiques par les travailleurs et assoir la compétitivité de l'industrie chimique. Ce règlement vise toutes les substances, y compris les substances naturelles et organiques utilisées dans des processus industriels et s'applique notamment aux produits textiles [ECH 06] [MIN 18].

l'industrie pétrolière, la priorité est accordée à ce secteur [CLA 07]. Néanmoins, des collaborations autres sont déjà en cours pour tester de nouvelles applications comme la couleur PILI[®] appliquée aux plastiques, aux encres, etc. Actuellement, les échantillons produits sont destinés à des tests internes, et l'accent est mis sur le développement de la gamme textile afin de commercialiser les premiers produits dans les deux à trois prochaines années, avant d'envisager une diversification. Deux axes principaux de travail sont développés simultanément pour surmonter les principaux obstacles : la réduction des coûts de production et la mise à l'échelle du processus [PIL 22b]. Il est également important de signaler que les colorants ne sont pas plus chers à produire, car bien que ce procédé soit radicalement nouveau dans le domaine des colorants, il repose essentiellement, comme évoqué précédemment, sur les mêmes procédés que ceux utilisés à grande échelle pour la production biologique de molécules thérapeutiques par exemple [RUT 16]. Ces procédés sont donc bien connus et les usines de production existent déjà. Ainsi, lorsque PILI[®] simule son développement (perspective personnelle de l'entreprise) et leurs développements (les couleurs innovantes) à grande échelle, les prix de vente obtenus sont du même ordre de grandeur que ceux des colorants pétrochimiques. Certains de leurs produits colorés sont en cours de développement, d'autres sont en cours de validation. Ils sont tous testés dans diverses applications, et certains sont déjà à un stade pré-industriel [COL 2020].

En parallèle de ces recherches, des profils détaillés des bactéries avec lesquelles l'entreprise collabore ont été établis. Dans le but de mieux connaître le cycle de vie des bactéries, l'entreprise s'est transformée en une sorte de ferme à cultivations, produisant des *cultures in situ* de la couleur, directement sur le tissu [BAN 17]. Les ingénieurs ont alors observé que les molécules étaient capables de créer, non seulement des couleurs spécifiques, mais aussi des motifs particuliers (fig. 2). Des motifs créés par le vivant lui-même.



Figure 2. Motifs obtenus par le procédé de synthèse enzymatique PILI[®]

On peut alors se demander s'il serait possible de guider les bactéries vers l'élaboration de motifs définis. Il s'agit par ailleurs d'un questionnement en cours d'étude par l'entreprise, en marge du développement industriel du procédé initial. Cette nouvelle problématique conduit à repenser l'industrie du textile, ces molécules étant aujourd'hui capables de produire des motifs uniques, exempt de contrôle. Ce phénomène conduit à l'émergence d'un changement de paradigme dans la production textile industrielle [BRO 17],

aujourd'hui portée l'homogénéisation et la tendance. En effet, ces motifs ne répondent ni à l'un, ni à l'autre finalement.

4. Conclusion

L'utilisation de colorants biosourcés dans l'industrie textile est une tendance croissante qui répond aux préoccupations environnementales et humaines actuelles. Les colorants biosourcés sont des colorants naturels extraits de sources renouvelables tels que les plantes, les algues, les champignons, etc., qui offrent une alternative durable aux colorants synthétiques traditionnels. Les avantages des colorants biosourcés ne se limitent pas à leur origine naturelle. Ils peuvent également être produits de manière plus respectueuse de l'environnement, avec des processus de production moins énergivores et moins polluants. Les colorants ainsi créés par l'entreprise PILI[®], hérités des procédés de la chimie organique et des biotechnologies, offrent aujourd'hui une alternative à la coloration textile prétréochimique en s'exemptant des contraintes de la coloration végétale plus artisanale. De plus, la biofabrication de ces colorants offre souvent une palette plus large et plus nuancée que les colorants synthétiques. L'utilisation de ces couleurs, coloris biosourcés, dans l'industrie textile, est donc une évolution prometteuse pour un secteur qui cherche à réduire son impact sur l'environnement, tout en répondant aux attentes des consommateurs en matière de gammes, de modes et de qualité. Contrairement aux idées toutes faites, le design-couleur écologique offre de belles perspectives esthétiques et innovantes pour nos consommations futures...

Bibliographie

- [ACU 04] ACUNER, E., DILEK, F.B., « Treatment of tectilon yellow 2G by *Chlorella vulgaris* », *Process Biochemistry*, n°5, 623-631, 2004.
- [AIK 04] AL-KDASI, A., IDRIS, A., SAED, K., GUAN, C.T., « Treatment of textile wastewater by advanced oxidation processes - A review », *Global Nest: the Int. J.*, n° 3, p. 222-230, 2004.
- [ANA 12] ANANTHASHANKAR, R., Treatment of Textile Effluent Containing Reactive Red 120 dye using Advanced Oxidation, Thèse de doctorat, Dalhousie University, 2012.
- [APP 13] APPERT, O., ALARIO, F., « Vers une chimie biosourcée ». *Annales des Mines - Réalités industrielles*, n° 1, P. 44-53, 2013.
- [BAN 17] BANG, Y., « Microbes Might Paint Your Next Party Dress », *JSTOR Daily*, 2017.
- [BAS 22] BASERI, S., « Natural Bio-Source Materials for Green Dyeing of Cellulosic Yarns », *Journal of Natural Fibers*, n° 9, p. 3517-3528, 2022.
- [BOI 23] BOISSONNAT, G., « From an idea to a product, development and scale-up of a biobased pigment », *SCF 2023 Congress Proceedings*, Société Chimique de France, Nantes, 2023.
- [BRO 17] BROOKS, A., FLETCHER, K., FRANCIS, R.A., RIGBY, E., D., ROBERTS, T., « Fashion, Sustainability, and the Anthropocene », *Special issue: Utopia and fashion*, n° 3, p. 482-504, 2017.
- [CLA 07] CLAUDIO, L., « Waste Couture : Environmental Impact of the Clothing Industry », *Environmental Health Perspectives*, n° 9, p. 448-454, 2007.
- [COL 20] COLLECTIF, *Savoir et faire les textiles*, Actes sud, Arles, 2020.
- [COR 23] COROT, L., « Pili s'appuie sur la fermentation industrielle pour produire colorants et pigments », *L'usine Nouvelle*, <https://www.usinenouvelle.com/editorial/l-instant-tech-pili-s-appuie-sur-la-fermentation-industrielle-pour-produire-colorants-et-pigments.N2104491>, 2023.

- [ECH 06] ECHA EUROPEAN CHEMICALS AGENCY. REACH n°1907/2006 legislation [Réglementation]. European Parliament and of the Council. <https://echa.europa.eu/fr/regulations/reach/understanding-reach-2006>.
- [ECH 23] ECHA EUROPEAN CHEMICALS AGENCY. Substance Infocard—Chloroaniline. <https://echa.europa.eu/fr/substance-information/-/substanceinfo/100.003.093>, 2023.
- [FOR 20] FORTIN, P., « Pili invente la couleur durable », *Les Echos*, <https://www.lesechos.fr/weekend/planete/pili-invente-la-couleur-durable-1915277>, 2020.
- [FUM 13] FUMEY, G., « Le textile dans la mondialisation malheureuse », *La Géographie*, n° 4, p. 32-33, 2013.
- [GLO 23] GLOVER, S., « Bio-based dyes startup Pili raises \$15.8m », *EcotextileNews*, <https://www.ecotextile.com/2023022830417/dyes-chemicals-news/bio-based-dyes-startup-pili-raises-15-8m.html>, 2023.
- [HAS 16] HASSAAN, M.A., Advanced oxidation processes of some organic pollutants in fresh and seawater, Thèse de doctorat, Port Said University, 2016.
- [HAS 17a] HASSAAN, M.A., & El Nemr., A., « Advanced Oxidation Processes for Textile Wastewater Treatment », *International Journal of Photochemistry and Photobiology*, n° 1, p. 27-35, 2017.
- [HAS 17b] HASSAAN, M.A., & El Nemr., A. « Health and Environmental Impacts of Dyes : Mini Review », *American Journal of Environmental Science and Engineering*, n° 3, p. 64-67, 2017.
- [HOL 16] HOLKAR, C.R., JADHAV, A.J., PINJARI, D.V., MAHAMUNI, N.M., PANDIT, A.B., « A critical review on textile wastewater treatments : Possible approaches », *Journal of Environmental Management*, p. 351-366, 2016.
- [HSE n/a] *Dyes and chemicals in textile finishing: An introduction*, Dyeing and Finishing Information Sheet, HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE, HSE. <https://www.hse.gov.uk/textiles/dyes-dyeing.htm>, n/a.
- [HSU 18] HSU, T., WELNER, D., RUSS, Z., CERVANTES, B., PRATHURI, R.L., ADAMS, P.D., DUBER, J.E., « Employing a biochemical protecting group for a sustainable indigo dyeing strategy », *Nature Chemical Biology*, p. 256-261, 2018.
- [JUA 96] JUANG, R., TSENG, R., WU, F., LIN, S., « Use of chitin and chitosan in lobster shell wastes for color removal from aqueous solutions », *Journal of Environmental Science and Health*, n° 2, p. 325-338, 1996.
- [KAT 80] KATZ, D.S., SOBIESKI, R.J., « Production of Pigment Precursors in *Serratia marcescens* at Elevated Temperatures », *Transactions of the Kansas Academy of Science*, n° 2, p. 91-94, 1980.
- [KHA 14] KHAN, S., MALIK, A., « Environmental and Health Effects of Textile Industry Wastewater », dans A. MALIK, E. GROHMANN, R. AKHTAR (dir.), *Environmental Deterioration and Human Health. Natural and anthropogenic determinants*, Springer, Pays-Bas, 2014.
- [LAN 19] LANDRAIN, T., ADENIS, M., BLACHE, J., BOISSONNAT, G., Utilisation de l'actinorhodine et de ses dérivés en tant qu'agent colorant (Patent N° EP3574050A1), 2019.
- [MIN 18] MINISTERE DE LA TRANSITION ECOLOGIQUE ET DE LA COHESION DES TERRITOIRES, & MINISTERE DE LA TRANSITION ENERGETIQUE. La réglementation REACH. <https://www.ecologie.gouv.fr/reglementation-reach>, 2018.
- [OGU 11] OGUGBUE, C.J., SAWIDIS, T., « Bioremediation and Detoxification of Synthetic Wastewater Containing Triarylmethane Dyes by *Aeromonas hydrophila* Isolated from Industrial Effluent », *Biotechnology Research International*, p. n/a, 2011.
- [PIL 22a] PILI INC., « Entre Toulouse, Paris et Lyon », *French PILI Bio*. <https://french.pili.bio/1/a-propos>, 2022.
- [PIL 22b] PILI INC., « Une technologie vivante qui s'appuie sur des usines cellulaires propres et puissantes », *French PILI Bio*. <https://french.pili.bio/9/technologie>, 2022.

- [RUT 16] RUTKIN, A., « Pigment-making microbes could replace dirty synthetic dyes », *NewScientist*, https://www.newscientist.com/article/mg22930552-500-pigment-making-microbes-could-replace-dirty-synthetic-dyes/?utm_source=NSNS, 2016.
- [TAY 08] TAYLOR, G.W., « Natural Dyes in Textile Applications », *Review of Progress in Coloration and Related Topics*, n° 1, p. 53-61, 2008.
- [WAN 09] WANG, H., ZHENG, X.W., SU, J.Q., TIAN, Y., XIONG, X.J., ZHENG, T.L., « Biological decolorization of the reactive dyes Reactive Black 5 by a novel isolated bacterial strain *Enterobacter* sp. EC3», *Journal of Hazardous Materials*, n° 1, p. 654-659, 2009.