



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أكلي محند أولحاج - البويرة

Université Akli Mohand OULHADJ – Bouira

كلية العلوم التطبيقية

Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie des Procédés
Laboratoire de Génie des Procédés



MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

En GÉNIE DES PROCÉDÉS

Spécialité Génie Chimique

Par :

GACI Ghenima

OSMANE Yasmine

Intitulé :

Intégration du recyclage chimique dans l'économie circulaire textile

Soutenu le : 29/06/2026

devant le Jury composé de :

ZIANI Salima	Pr	Université de Bouira	Présidente
EL HANAFI Nawel	MCA	Université de Bouira	Examinatrice
AIT ALI Salima	MCA	Université de Bouira	Encadrante
ZAABAR Aida	Pr	Université de Bouira	Co-Encadrante

Année Universitaire 2025/2026



Nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude à Dieu Tout-Puissant, qui nous a accordé la force, la patience et le courage nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous adressons nos sincères remerciements à notre encadrante, Mme AIT ALI Salima, pour son accompagnement, sa disponibilité, ses orientations précieuses et ses conseils tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nous remercions également notre co-encadrante, Mme ZAABAR Aida, pour son aide, ses remarques constructives et l'intérêt qu'elle a porté à ce travail. Ses conseils ont contribué à l'amélioration de cette étude.

Nos remerciements s'adressent aussi aux membres du jury, Mme ZIANI Salima, Présidente, et Mme EL HANAFI Nawel, Examinatrice, pour avoir accepté d'évaluer ce mémoire et pour le temps consacré à sa lecture.

Nous exprimons notre reconnaissance à l'ensemble des enseignants du Département de Génie des Procédés de l'Université de Bouira, pour la qualité de la formation qu'ils nous ont assurée durant notre parcours universitaire.

Nous remercions toutes les personnes qui nous ont aidées, de près ou de loin, dans la réalisation de ce travail, ainsi que le personnel du laboratoire pour sa disponibilité et sa collaboration.

Enfin, nous remercions profondément nos familles pour leur soutien moral, leurs encouragements constants et leur confiance. Une pensée particulière va à nos parents, pour leurs sacrifices, leur amour et leur présence tout au long de notre parcours.

À toutes et à tous, merci.



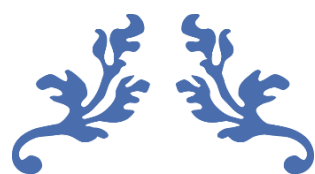


TABLE DES MATIERES



Introduction Générale 1

Chapitre I : Cadre Conceptuel et Théorique de L'Etude

I.1. Introduction générale : textile, environnement et circularité.....	4
I.2. Contexte local de l'étude : cas d'ALCOVEL/TEXALG d'Akbou	5
I.3. Impacts environnementaux de la chaîne textile	6
I.4. Economie circulaire appliquée aux textiles.....	9
I.5. Cadre réglementaire et initiatives internationales.....	11
I.6. Recyclage des textiles : positionnement des voies existantes	13
I.7. Recyclage chimique : définitions, principes et familles de procédés	15
I.8. Adaptation des procédés aux différentes compositions textiles	17
I.8.1. Fibres cellulosiques : coton, viscose et cellulose régénérée	17
I.8.2. Fibres synthétiques : cas du polyester/PET	18
I.8.3. Mélanges coton/polyester et textiles complexes.....	19
I.9. Conditions d'intégration industrielle : collecte, tri, qualité et économie.....	20
I.10. Limites, risques et leviers d'amélioration.....	22
I.10.1. Limites techniques	23
I.10.2. Limites environnementales et sanitaires	23
I.10.3. Limites économiques et organisationnelles	23
I.11. Conclusion.....	24
I.12. Références Bibliographiques	25

Chapitre II : Matériels et Méthodes

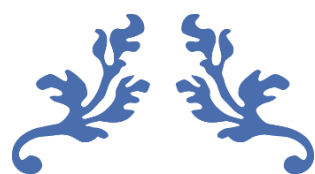
I.1. Introduction générale : textile, environnement et circularité.....	31
II.1. Collecte	31
II.2. Tri.....	31
II.2.1. Identification des fibres textiles par test de combustion	32
II.3. Préparation d'un adsorbant textile par traitement chimique	33
II.3.1. Blanchiment	33
II.3.2 L'hydrolyse acide.....	33
II.3.3 Acétylation	34
II.4. pH au point de charge nulle (pH_{pzc})	36

II.5. Évaluation des fibres comme adsorbant pour l'élimination du bleu de méthylène	36
II.5.1 Principe de la spectrophotomètre UV-Visible	36
II.5.2 Courbe d'étalonnage du bleu de méthylène	38
II.6. Conclusion	38
II.7. Références Bibliographiques.....	39

Chapitre III : Résultats et Discussion

III.1. Identification des déchets textiles par le test de combustion	41
III.2. Détermination du pH au point de charge nulle (pH_{PCZ}) des textiles traités	43
III.2.1. Traitement par HCl à 80%	43
III.2.1. Traitement par H_3PO_4 à 40%	44
III.3 Adsorption du bleu de méthylène par les textiles traités	48
III.3.1 Effet du pH sur l'adsorption du bleu de méthylène par le textile traité au H_3PO_4 , avec et sans acétylation.....	48
III.3.2. Effet du pH sur l'adsorption du bleu de méthylène par le coton traité au HCl avec acétylation.....	50
III.3.3. Effet de la concentration initiale sur l'adsorption du bleu de méthylène par le coton traité au H_3PO_4 , avec et sans acétylation.....	51
III.3.4 Effet de la masse d'adsorbant sur l'adsorption du bleu de méthylène par le coton traité au H_3PO_4 , avec et sans acétylation.....	53
III.4. Étude comparative et positionnement des résultats	54
III.5. Conclusion	57
III.6. Références bibliographiques	58

Conclusion Générale	61
----------------------------------	-----------



LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX



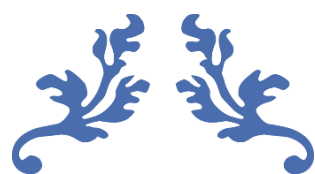
LISTE DES FIGURES

Figure I.1. Représentation du principe « Cradle to Cradle » dans une logique d'économie circulaire	5
Figure I.2. Localisation de l'unité ALCOVEL/TEXALG – Akbou.	6
Figure I.3. Schéma des principales voies de valorisation des déchets textiles, avec un focus sur le recyclage chimique et les boucles de réintégration matière.....	11
Figure I.4. Chaîne simplifiée d'un recyclage chimique textile	18
Figure I.5. Arbre d'aide à la décision pour orienter un déchet textile vers la voie de valorisation la plus adaptée, figure élaborée à partir des principes d'orientation des flux textiles décrits par Loo et al.	23
Figure II.1. Principales étapes de collecte et de préparation des déchets textiles.	31
Figure II.2. Tri des déchets textiles selon la nature et la couleur des fibres.....	32
Figure II.3. Test de combustion du coton et du polyester	32
Figure II.4. Étapes de transformation d'un déchet textile blanchi en matériau fibreux.	33
Figure II.5. Étapes suivies pour l'obtention de cellulose.	34
Figure II.6. Schéma explicatif de l'acétylation du coton hydrolysé.....	35
Figure II.7. Principe de la spectrophotométrie UV-Visible.	38
Figure II.8. Courbe d'étalonnage du bleu de méthylène	39
Figure III.1. pH au point de charge zéro (pH_{PCZ}) du textile traité par HCl sans acétylation.	43
Figure III.2. pH au point de charge zéro (pH_{PCZ}) du textile traité par HCl avec acétylation.	43
Figure III.3. pH au point de charge zéro (pH_{PCZ}) du textile traité par H_3PO_4 sans acétylation.....	45
Figure III.4. pH au point de charge zéro (pH_{PCZ}) du textile traité par H_3PO_4 avec acétylation.....	45
Figure III.5. Effet du pH sur le rendement d'adsorption du bleu de méthylène par le textile traité par H_3PO_4 sans acétylation.	49
Figure III.6. Effet du pH sur le rendement d'adsorption du bleu de méthylène par le textile traité par H_3PO_4 avec acétylation.....	50
Figure III.7. Effet du pH sur le rendement d'adsorption du bleu de méthylène par le textile traité par HCl avec acétylation.....	51
Figure III.8. Effet de la concentration initiale du bleu de méthylène sur le rendement d'adsorption par le textile traité par H_3PO_4 sans acétylation.....	52

Figure III.9. Effet de la concentration du bleu de méthylène sur le rendement d'adsorption de BM par le textile traité par H_3PO_4 avec acétylation.	53
Figure III.10. Effet de masse de la suspension sur le rendement d'adsorption de BM par le textile traité par H_3PO_4 sans acétylation.	54
Figure III.11. Effet de masse de la suspension sur le rendement d'adsorption de BM par le textile traité par H_3PO_4 avec acétylation.....	55

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1. Principaux impacts environnementaux de la chaîne textile et lien avec le recyclage chimique	8
Tableau I.2. Principes de l'économie circulaire et rôle du recyclage chimique	11
Tableau I.3. Cadre d'action international et effets attendus sur le recyclage textile.....	13
Tableau I.4. Comparaison des voies de recyclage textile	15
Tableau I.5. Principales familles de procédés de recyclage chimique textile	18
Tableau I.6. Questions opérationnelles pour intégrer le recyclage chimique dans une usine textile	22
 Tableau III.1. Résultats du test de combustion des différents échantillons textiles.....	42
Tableau III.2. Comparaison du pH_{PCZ} et des propriétés de surface des textiles traités par HCl et H_3PO_4 , avant et après acétylation.	48
Tableau III.3. Positionnement comparatif des textiles traités vis-à-vis de quelques adsorbants rapportés pour l'élimination du bleu de méthylène	56



INTRODUCTION GENERALE



L'industrie textile occupe une place importante dans l'économie mondiale et dans la vie quotidienne. Elle fournit des produits indispensables, notamment les vêtements, les textiles d'ameublement et les matériaux techniques. Cependant, son développement rapide s'accompagne d'impacts environnementaux importants. La production textile consomme de grandes quantités d'eau, d'énergie, de matières premières et de produits chimiques. Elle génère également des émissions de gaz à effet de serre, des rejets polluants et une quantité considérable de déchets solides [1].

Cette situation est accentuée par le modèle de la « fast fashion », basé sur une production rapide, un renouvellement fréquent des collections et une durée d'utilisation de plus en plus courte des vêtements. Ce mode de consommation favorise l'accumulation des déchets textiles, dont une grande partie reste encore orientée vers l'enfouissement, l'incinération ou des filières de valorisation limitées [1,2]. Face à cette problématique, l'économie circulaire apparaît comme une approche essentielle. Elle vise à réduire le gaspillage des ressources, à prolonger la durée de vie des produits et à réintégrer les déchets dans de nouveaux cycles de valorisation [2].

Dans ce contexte, les déchets textiles ne doivent plus être considérés uniquement comme des résidus à éliminer, mais comme des matières secondaires pouvant être transformées en matériaux à valeur ajoutée. Parmi ces déchets, ceux constitués de coton présentent un intérêt particulier. Le coton est principalement composé de cellulose, un biopolymère naturel, renouvelable et riche en groupements hydroxyle. Cette composition permet d'envisager différentes modifications chimiques, telles que le blanchiment, l'hydrolyse acide et l'acétylation, afin d'améliorer les propriétés du matériau et de l'adapter à de nouvelles applications [3,4].

Parallèlement, la pollution des eaux par les colorants synthétiques constitue un enjeu environnemental majeur. Ces substances, largement utilisées dans l'industrie textile et dans d'autres secteurs, peuvent modifier la qualité des eaux, limiter la pénétration de la lumière et perturber les écosystèmes aquatiques. Certains colorants sont également difficiles à éliminer en raison de leur stabilité chimique [5]. Le bleu de méthylène est souvent utilisé comme colorant modèle dans les études d'adsorption, car il présente une forte coloration, une bonne stabilité en solution aqueuse et une détection simple par spectrophotométrie UV-Visible [6].

Parmi les procédés de traitement des eaux contaminées, l'adsorption est considérée comme une méthode simple, efficace et adaptable. Elle présente l'avantage de pouvoir utiliser des matériaux peu coûteux, notamment des adsorbants préparés à partir de déchets [7,8]. Ainsi, la

transformation de déchets textiles en adsorbants permet de répondre à deux préoccupations complémentaires : la valorisation des déchets solides et l'élimination des polluants organiques présents dans l'eau.

Dans le cadre de ce travail, l'étude porte sur la valorisation de déchets textiles issus de l'industrie ALCOVEL/TEXALG, située dans la zone industrielle d'Akbou, wilaya de Béjaïa. Les déchets retenus sont constitués de coton blanc à 100 %, ce qui permet de travailler sur une matière homogène et adaptée aux traitements chimiques. Après collecte, tri et identification des fibres, les échantillons sont soumis à des étapes de blanchiment, d'hydrolyse acide et d'acétylation. Les matériaux obtenus sont ensuite évalués comme adsorbants pour l'élimination du bleu de méthylène en solution aqueuse.

La problématique de ce mémoire peut être formulée ainsi : comment valoriser un déchet textile en coton, issu d'un contexte industriel local, en un matériau adsorbant capable de contribuer au traitement des eaux contaminées par un colorant organique ?

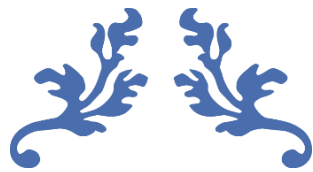
L'objectif principal de ce travail est donc de préparer des adsorbants à partir de déchets textiles en coton blanc et d'évaluer leur efficacité dans l'adsorption du bleu de méthylène. Pour atteindre cet objectif, plusieurs étapes sont réalisées : collecte et tri des déchets, identification de la nature des fibres, modification chimique du coton, détermination du pH au point de charge nulle et essais d'adsorption en mode discontinu.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres. Le premier chapitre présente le cadre conceptuel et théorique de l'étude. Il aborde les impacts environnementaux de l'industrie textile, l'économie circulaire, le recyclage des déchets textiles et les principales voies de valorisation, avec un intérêt particulier pour le recyclage chimique. Le deuxième chapitre décrit le matériel utilisé et les méthodes expérimentales adoptées, depuis la collecte des déchets jusqu'aux essais d'adsorption du bleu de méthylène. Le troisième chapitre est consacré à la présentation et à la discussion des résultats obtenus, afin d'évaluer le potentiel des matériaux préparés dans l'élimination du colorant.

Ainsi, ce travail s'inscrit dans une démarche de valorisation environnementale visant à donner une seconde vie à un déchet textile local, tout en proposant une solution simple et durable pour le traitement des eaux polluées par les colorants organiques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Niinimäki, K., Peters, G., Dahlbo, H., Perry, P., Rissanen, T., & Gwilt, A. (2020). The environmental price of fast fashion. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(4), 189–200. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0039-9>.
- [2] Sandin, G., & Peters, G. M. (2018). Environmental impact of textile reuse and recycling – A review. *Journal of Cleaner Production*, 184, 353–365. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.266>.
- [3] Haslinger, S., Hummel, M., Anghelescu-Hakala, A., Määtänen, M., & Sixta, H. (2019). Upcycling of cotton polyester blended textile waste to new man-made cellulose fibers. *Waste Management*, 97, 88–96. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.07.040>.
- [4] Homem, N. C., & Amorim, M. T. P. (2020). Synthesis of cellulose acetate using as raw material textile wastes. *Materials Today Proceedings*, 31, S315–S317. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.494>.
- [5] Yagub, M. T., Sen, T. K., Afroze, S., & Ang, H. (2014). Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 209, 172–184. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2014.04.002>.
- [6] Rafatullah, M., Sulaiman, O., Hashim, R., & Ahmad, A. (2009). Adsorption of methylene blue on low-cost adsorbents: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 177(1–3), 70–80. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.12.047>.
- [7] Crini, G. (2005). Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: A review. *Bioresource Technology*, 97(9), 1061–1085. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.05.001>.
- [8] Gupta, V., & Suhas. (2009). Application of low-cost adsorbents for dye removal – A review. *Journal of Environmental Management*, 90(8), 2313–2342. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.11.017>.



CHAPITRE I

CADRE CONCEPTUEL ET THEORIQUE DE L'ÉTUDE



I.1. Introduction générale : textile, environnement et circularité

L'industrie textile occupe une place importante dans l'économie mondiale, mais elle est également fortement concernée par les enjeux environnementaux actuels. Tout au long de son cycle de vie, depuis la production des fibres jusqu'à la fin de vie des articles, elle mobilise d'importantes quantités d'eau, d'énergie, de matières premières et de substances chimiques. Ces activités génèrent des impacts variés, notamment des émissions de gaz à effet de serre, des rejets liquides, une pollution chimique, une dispersion de microfibres et une accumulation croissante de déchets textiles [1–3]. Les travaux de Niinimäki et al. soulignent notamment que l'industrie de la mode est associée à une consommation très élevée d'eau, à des émissions de CO₂ et à une production massive de déchets textiles [1].

Le modèle linéaire traditionnel, fondé sur la logique « extraire, produire, consommer, jeter », montre aujourd'hui ses limites face à la raréfaction des ressources et aux enjeux climatiques. Cette situation est accentuée par la fast fashion, caractérisée par une production rapide, un renouvellement fréquent des collections et une réduction de la durée d'utilisation des vêtements. Ce mode de consommation favorise la surproduction, l'achat excessif et l'augmentation des déchets textiles [1,4].

La figure I.1 illustre le principe « Cradle to Cradle », qui s'inscrit dans cette logique circulaire. Contrairement au modèle linéaire, cette approche considère que les matières ne doivent pas être éliminées en fin de vie, mais réintégrées dans de nouveaux cycles d'utilisation. Elle distingue notamment le cycle biologique, associé aux matières biodégradables, et le cycle technologique, qui concerne les matériaux destinés à être réutilisés, réparés ou recyclés [7].

Dans le domaine textile, cette approche souligne l'importance de concevoir des produits durables dès les premières étapes de leur cycle de vie. Lorsque les articles ne peuvent plus être réutilisés ou réparés, le recyclage constitue une voie importante de valorisation. Parmi ses différentes formes, le recyclage chimique suscite un intérêt croissant, car il peut permettre de

traiter certains déchets complexes, notamment les fibres synthétiques, les textiles mélangés ou les matériaux fortement dégradés [9–12].



Figure I.1. Représentation du principe « Cradle to Cradle » dans une logique d'économie circulaire [7].

Cependant, le recyclage chimique ne doit pas être considéré comme une solution unique. Son intérêt dépend de la qualité du tri, de la composition des déchets, des procédés utilisés, de l'énergie consommée et des impacts associés aux étapes de purification [9,11,12]. Ainsi, son intégration dans l'économie circulaire textile doit être analysée de manière critique, en tenant compte à la fois de son potentiel de valorisation et de ses limites techniques, économiques et environnementales.

Face à ces limites, l'économie circulaire apparaît comme une approche essentielle pour rendre le secteur textile plus durable. Elle vise à réduire l'utilisation de ressources vierges, à prolonger la durée de vie des produits et à limiter la production de déchets. Dans cette logique, les actions prioritaires concernent l'écoconception, la réparation, le réemploi et la réutilisation, tandis que le recyclage intervient comme une solution de valorisation lorsque les autres options ne sont plus possibles [5,6].

Dans ce mémoire, l'objectif est d'examiner la place du recyclage chimique dans la transition vers une industrie textile plus circulaire. Il s'agit d'analyser son potentiel pour la valorisation des déchets textiles, tout en considérant les conditions nécessaires à son intégration dans une stratégie durable de gestion des textiles en fin de vie.

I.2. Contexte local de l'étude : cas d'ALCOVEL/TEXALG d'Akbou

L'Algérie des Cotonnades et Velours, connue sous l'abréviation ALCOVEL, est une société par actions implantée à Akbou, dans la wilaya de Béjaïa. Rattachée au secteur du textile et de l'habillement, elle est spécialisée dans la production de velours, de tissus d'ameublement, de tissus spéciaux, ainsi que dans la transformation du coton et de certaines fibres synthétiques [13].

Créée le 25 janvier 1998 dans le cadre de la filialisation du secteur textile public algérien, ALCOVEL est située à l'ouest de la ville d'Akbou, au niveau de la zone industrielle, sur l'axe de la route nationale n°26. Sa structure intégrée, regroupant plusieurs étapes de production telles que la filature, le tissage et le finissage, en fait un terrain pertinent pour l'étude de la circularité textile.

En effet, ces différentes activités peuvent générer plusieurs types de rebuts, notamment des fils non conformes, des lisières, des chutes de tissus, des tissus déclassés, des bains de finition usés et des déchets d'emballage. Ainsi, le choix d'ALCOVEL/TEXALG comme terrain local permet d'aborder la valorisation des déchets textiles à partir d'un contexte industriel réel.



Figure I.2. Localisation de l'unité ALCOVEL/TEXALG – Akbou

I.3. Impacts environnementaux de la chaîne textile

La chaîne textile exerce des pressions importantes sur l'environnement à toutes les étapes de son cycle de vie, de la production des fibres à la fin de vie des produits. Ces impacts concernent principalement les émissions de gaz à effet de serre, la consommation d'eau, l'utilisation de substances chimiques, la libération de microfibres et l'accumulation de déchets textiles. Leur intensité varie selon la nature des fibres, les procédés de fabrication, le mix énergétique, les traitements d'ennoblissement, la durée d'usage et les modes de gestion en fin de vie [14,15].

Les fibres naturelles, notamment le coton conventionnel, consomment beaucoup d'eau, de terres agricoles, d'engrais et de pesticides. A l'inverse, les fibres synthétiques, comme le polyester, le polyamide ou l'acrylique, dépendent principalement de ressources fossiles et libèrent des microfibres plastiques lors du lavage. Ces particules, difficiles à retenir totalement par les systèmes de traitement des eaux usées, peuvent ensuite rejoindre les milieux aquatiques [15,16].

Les étapes d'ennoblissement textile, telles que le blanchiment, la teinture, l'impression et les apprêts, constituent également une source importante d'impacts environnementaux. Elles nécessitent des quantités variables d'eau, d'énergie et de produits chimiques, notamment des colorants, des auxiliaires de teinture et des agents de finition. Lorsque ces substances ne sont pas correctement traitées, elles contribuent à la pollution des eaux et des sols [14,17].

La fin de vie des textiles représente un autre enjeu majeur. Une part importante des vêtements et des déchets textiles reste orientée vers l'enfouissement, l'incinération ou l'exportation vers des marchés de seconde main. Or, ces voies ne garantissent pas toujours une valorisation durable, en particulier lorsque les produits sont abîmés, mélangés ou difficiles à trier. Le recyclage textile-à-textile demeure encore limité, notamment à cause de la présence de mélanges fibreux, de colorants, d'accessoires, de fils multi-composants et de traitements de finition qui compliquent la séparation des matières [14,18].

Dans ce contexte, le recyclage chimique apparaît comme une piste intéressante pour valoriser certaines fractions textiles non réemployables ou difficiles à recycler mécaniquement. Il permet de récupérer des monomères, des polymères ou des fibres régénérées réintroduits dans de nouveaux cycles de production. Cependant, son intérêt environnemental doit être évalué avec prudence, car il dépend de la qualité du tri, de la composition des déchets, des rendements obtenus, de l'énergie consommée et des étapes de purification nécessaires [18,19].

Ainsi, toute stratégie de circularité textile doit être analysée à l'échelle du cycle de vie complet. Une solution de recyclage n'est réellement pertinente que si elle permet de réduire les impacts globaux par rapport à la production de matières vierges et aux scénarios classiques de fin de vie. Les analyses de cycle de vie constituent donc un outil essentiel pour comparer les différentes options, telles que la réduction à la source, le réemploi, la réparation, le recyclage mécanique, le recyclage chimique ou la valorisation énergétique en dernier recours [15,19].

A l'échelle d'une entreprise textile comme ALCOVEL/TEXALG–Akbou, ces enjeux peuvent être traduits en indicateurs concrets : quantité de déchets générés par tonne produite, taux de tri à la source, consommation spécifique d'eau et d'énergie, part de déchets réemployés en interne, taux de recyclage matière et coût de traitement par type de déchet. Ces indicateurs permettent de mieux orienter les choix techniques et d'éviter une communication environnementale non vérifiable.

Tableau I.1. Principaux impacts environnementaux de la chaîne textile et lien avec le recyclage chimique [14-19].

Catégorie d'impact	Sources principales dans la chaîne textile	Lien avec le recyclage chimique
Émissions de gaz à effet de serre	Production des fibres, énergie utilisée en filature, tissage, ennoblement, transport et fin de vie	Peut réduire l'usage de matières vierges, mais son bénéfice dépend de l'énergie consommée par le procédé
Consommation d'eau	Culture du coton, teinture, lavage industriel et traitements de finition	Peut éviter une partie de la production primaire, mais ne supprime pas les besoins en eau liés aux procédés textiles
Pollution chimique	Pesticides, colorants, auxiliaires de teinture, apprêts et agents de finition	Les contaminants peuvent perturber la dissolution ou la dépolymérisation et nécessiter une purification
Microfibres	Lavage et usure des textiles synthétiques	Ne résout pas seul le problème des microfibres ; l'écoconception et le choix des fibres restent nécessaires
Déchets solides	Chutes de production, invendus, vêtements usagés et textiles non réemployables	Permet de valoriser certaines fractions complexes ou non adaptées au réemploi et au recyclage mécanique

I.4. Economie circulaire appliquée aux textiles

L'économie circulaire appliquée aux textiles vise à conserver la valeur des matières le plus longtemps possible, en évitant que les produits ne deviennent rapidement des déchets. Dans ce secteur, elle repose sur une combinaison de leviers complémentaires : concevoir des articles plus durables, faciliter leur entretien et leur réparation, prolonger leur usage par le réemploi, améliorer la collecte et le tri, puis orienter les fractions non réutilisables vers des filières de recyclage adaptées [20,21].

Dans cette logique, la notion de boucle occupe une place centrale. Une boucle fermée, ou *textile-to-textile*, consiste à réutiliser la matière issue d'un textile usagé pour produire de nouvelles fibres textiles de qualité suffisante. A l'inverse, une boucle ouverte correspond à une valorisation dans d'autres secteurs, par exemple la plasturgie, les composites, les matériaux d'isolation ou certains produits chimiques. La boucle fermée est généralement plus exigeante, car elle nécessite une matière mieux triée, plus pure et conforme aux exigences de la production textile [22].

Les principes de circularité textile peuvent être regroupés autour de trois étapes. La première concerne la conception, avec le choix de fibres recyclables, la limitation des mélanges complexes, la réduction des accessoires difficiles à séparer et une meilleure information sur la composition des produits. La deuxième concerne la phase d'usage, à travers la qualité des articles, la réparabilité, l'entretien sobre, la location, la mutualisation ou la seconde main. La troisième concerne la fin de vie, qui nécessite une collecte sélective, un tri efficace, une préparation des matières et le recours à des procédés de recyclage mécanique, chimique ou biologique selon la nature des déchets [21,23].

Dans ce mémoire, le recyclage chimique est donc considéré comme un outil parmi d'autres, et non comme une solution unique. Il peut être pertinent pour certains déchets textiles difficiles à valoriser mécaniquement, notamment les mélanges fibreux, les textiles fortement dégradés ou les flux nécessitant une séparation plus poussée. Toutefois, son intérêt dépend de la qualité du tri, de la composition des déchets, des rendements obtenus, de la consommation d'énergie et de la possibilité de réintroduire réellement la matière récupérée dans une nouvelle chaîne de production [22].

Ainsi, une stratégie circulaire efficace doit respecter une hiérarchie de valorisation : réduire d'abord les pertes et la surproduction, prolonger l'usage lorsque cela est possible, privilégier le réemploi pour les articles encore fonctionnels, puis réserver le recyclage aux fractions qui ne

peuvent plus conserver leur fonction initiale. Dans ce cadre, le recyclage mécanique peut convenir aux flux propres et homogènes, tandis que la dissolution, la dépolymérisation ou d'autres procédés chimiques peuvent être envisagés pour des flux plus complexes [22].

Afin de mieux situer le recyclage chimique dans une démarche d'économie circulaire textile, la figure I.3 présente les principales voies de valorisation envisageables après la collecte, le tri et la caractérisation des déchets textiles. Elle met en évidence la complémentarité entre le réemploi, le recyclage mécanique, le recyclage chimique et les solutions de dernier recours, en fonction de l'état, de la composition et du potentiel de valorisation des flux.

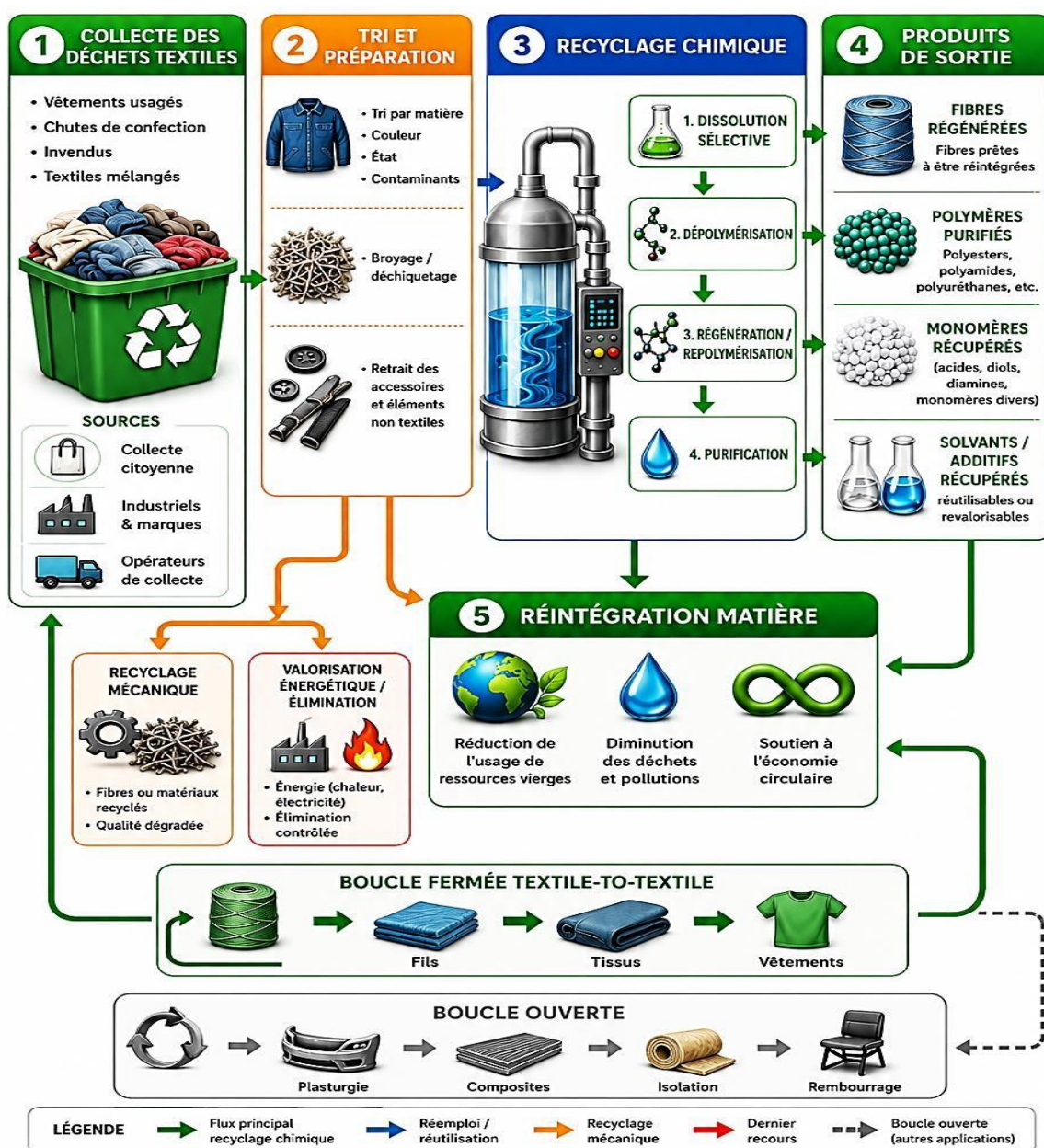


Figure I.3. Schéma des principales voies de valorisation des déchets textiles, avec un focus sur le recyclage chimique et les boucles de réintégration matière.

Le tableau I.2 complète cette représentation en précisant les principes circulaires associés aux différentes étapes de gestion des textiles, ainsi que les conditions dans lesquelles le recyclage chimique peut contribuer à la réintégration des matières dans de nouveaux cycles de production.

Tableau I.2. Principes de l'économie circulaire et rôle du recyclage chimique [20–23].

Principe circulaire	Application textile	Contribution du recyclage chimique
Prévention	Limiter la surproduction et optimiser les coupes	Réduit le volume de déchets à traiter et améliore la viabilité des flux restants
Écoconception	Choisir des fibres compatibles, améliorer l'étiquetage et faciliter la démontabilité	Facilite la séparation des matières et améliore la pureté des produits recyclés
Réemploi	Développer la seconde main, la réparation et la réutilisation interne	Reste prioritaire lorsque l'article conserve une fonction d'usage
Recyclage matière	Mobiliser le recyclage mécanique, la dissolution ou la dépolymérisation	Permet de récupérer des fibres, polymères ou monomères pour de nouvelles applications
Traçabilité	Utiliser des données fiables sur la composition et les traitements appliqués	Aide à orienter les textiles vers le procédé de valorisation le plus adapté

I.5. Cadre réglementaire et initiatives internationales

Le cadre réglementaire relatif au secteur textile évolue progressivement vers une meilleure prise en compte de la durabilité et de la circularité. Cette évolution s'explique par la nécessité de réduire les impacts environnementaux liés à la production, à la consommation et à la fin de vie des textiles. Les politiques récentes ne se limitent plus à la gestion des déchets, mais cherchent à agir plus en amont, en encourageant la conception de produits plus durables, plus réparables et plus facilement recyclables [24,25].

Dans cette perspective, l'écoconception occupe une place importante. Elle vise à intégrer, dès la phase de conception, des critères liés à la durée de vie du produit, à la facilité de réparation, à la composition des fibres et à la possibilité de recyclage. Pour les procédés de recyclage

avancé, notamment le recyclage chimique, cette approche est essentielle, car elle permet de limiter certains obstacles liés aux mélanges complexes, aux accessoires difficiles à séparer ou aux substances susceptibles de perturber la valorisation des matières [25,26].

La responsabilité élargie du producteur constitue également un levier majeur. En impliquant les producteurs dans la gestion de la fin de vie des produits qu'ils mettent sur le marché, ce dispositif peut contribuer à améliorer l'organisation de la collecte, du tri et du traitement des déchets textiles. Toutefois, son efficacité dépend de plusieurs conditions, notamment la qualité des infrastructures disponibles, l'existence de débouchés industriels et la capacité à orienter les flux vers des solutions réellement adaptées [24,27].

La traçabilité représente un autre élément central des initiatives internationales. Le développement du passeport numérique des produits pourrait permettre de rendre accessibles des informations fiables sur la composition des textiles, les matériaux utilisés, les traitements appliqués et les possibilités de réparation ou de recyclage. Ces données sont particulièrement utiles pour orienter les déchets vers la filière la plus appropriée, qu'il s'agisse du réemploi, du recyclage mécanique ou de procédés chimiques tels que la dissolution, l'hydrolyse ou la glycolyse [28].

Ces évolutions réglementaires peuvent également concerner les pays situés en dehors de l'Union européenne. Les entreprises productrices ou transformatrices qui souhaitent accéder à des marchés exigeants devront progressivement répondre à des critères plus stricts en matière de qualité, de durabilité et de transparence. Pour une entreprise textile algérienne, l'enjeu est donc d'anticiper ces exigences afin de développer des pratiques compatibles avec les standards internationaux.

Ainsi, le cadre réglementaire et les initiatives internationales ne constituent pas seulement un contexte général. Ils influencent directement les conditions de mise en œuvre du recyclage textile, en particulier lorsque celui-ci nécessite des flux bien identifiés, des informations fiables sur les matières et des critères de qualité clairement définis.

Afin de synthétiser les principaux leviers issus du cadre réglementaire et des initiatives internationales, le tableau I.3 présente les instruments les plus pertinents pour la circularité textile. Il met en relation chaque dispositif avec son objectif principal et précise son implication potentielle pour le recyclage chimique. Cette lecture permet de montrer que la réussite du recyclage avancé ne dépend pas uniquement des performances technologiques, mais aussi de la

qualité des politiques de collecte, de tri, de traçabilité, d'écoconception et d'évaluation des matières recyclées.

Tableau I.3. *Cadre d'action international et effets attendus sur le recyclage textile [24–28].*

Instrument / initiative	Objectif principal	Implication pour le recyclage chimique
Politiques de circularité textile	Réduire les impacts du textile sur l'ensemble du cycle de vie	Renforce la place du recyclage comme solution complémentaire après prévention, réemploi et réparation
Écoconception	Améliorer la durabilité, la réparabilité et la recyclabilité des textiles	Réduit les obstacles liés aux mélanges complexes, aux accessoires et aux composants perturbateurs
Responsabilité élargie du producteur	Structurer le financement et l'organisation de la collecte, du tri et du traitement	Peut améliorer la disponibilité de flux préparés pour des procédés de recyclage avancés
Passeport numérique des produits	Fournir des données fiables sur la composition et la durabilité	Facilite l'orientation des déchets vers la dissolution, l'hydrolyse, la glycolyse ou d'autres procédés adaptés
Normes et méthodes d'évaluation	Harmoniser les critères de qualité, de durabilité et de recyclabilité	Facilite la comparaison des technologies et la qualification des matières recyclées

Après avoir situé les enjeux réglementaires et les exigences croissantes en matière de traçabilité et de recyclabilité, il convient maintenant de présenter les principales voies de valorisation disponibles pour les déchets textiles.

I.6. Recyclage des textiles : positionnement des voies existantes

Le recyclage textile regroupe plusieurs voies de valorisation qui se distinguent par leur principe, leur niveau de maturité technologique et la qualité des matières récupérées. Le choix d'une voie dépend principalement de la composition du déchet, de son état de propreté, de son degré de

dégradation, ainsi que du débouché visé. Ainsi, les flux homogènes peuvent être orientés vers des procédés relativement simples, tandis que les textiles mélangés, contaminés ou fortement transformés nécessitent des approches plus sélectives [29,30].

Parmi les solutions existantes, le recyclage mécanique reste l'une des options les plus utilisées, notamment pour les flux propres et peu dégradés. Les procédés thermomécaniques concernent plutôt les polymères thermoplastiques, comme le polyester, lorsque leur composition permet une remise en forme par la chaleur. Le recyclage chimique, quant à lui, intervient lorsque la séparation ou la transformation des constituants devient nécessaire pour récupérer des polymères purifiés, des oligomères ou des monomères réutilisables [31,32].

Des voies biologiques et enzymatiques sont également étudiées, en particulier pour certains polymères comme la cellulose ou le PET. Elles suscitent un intérêt croissant en raison de conditions réactionnelles potentiellement plus douces, mais leur développement industriel reste encore limité par des contraintes de vitesse, de coût, de sélectivité et de montée en échelle [33,34].

Ainsi, les différentes technologies ne doivent pas être opposées de manière absolue. Dans une logique de gestion durable des déchets textiles, elles doivent plutôt être considérées comme complémentaires. Le réemploi et la réparation restent prioritaires lorsque l'article conserve une fonction d'usage, tandis que les voies de recyclage sont mobilisées pour les fractions qui ne peuvent plus être utilisées directement. Le tableau I.4 synthétise les principales options disponibles en précisant, pour chacune, le principe général, les avantages et les limites.

Tableau I.4. Comparaison des voies de recyclage textile [29–34].

Voie	Principe	Avantages	Limites
Réemploi / réparation	Maintenir l'article dans sa fonction initiale	Réduction importante des impacts ; faible transformation	Dépend de l'état du produit, de la demande et de la logistique
Recyclage mécanique	Transformer les textiles par découpe, effilochage, cardage ou extrusion	Technologie disponible ; coûts relativement faibles	Perte possible de qualité des fibres ; besoin de flux propres et homogènes

Voie	Principe	Avantages	Limites
Recyclage thermomécanique	Refondre ou retraiter des polymères thermoplastiques	Adapté à certains flux synthétiques, notamment le polyester	Sensibilité aux contaminants, aux mélanges et à la dégradation thermique
Dissolution sélective	Dissoudre une fibre ou un polymère sans le dépolymériser	Séparation possible de certains mélanges ; récupération de polymères	Choix du solvant, purification et compatibilité des matières
Dépolymérisation	Rompre les chaînes polymères en monomères ou oligomères	Possibilité d'obtenir une matière proche du vierge après purification	Besoin d'énergie, de catalyseurs, de purification et d'investissement
Voies enzymatiques	Utiliser des enzymes pour hydrolyser des polymères ciblés	Conditions réactionnelles potentiellement plus douces	Réactions lentes, coût des enzymes, sensibilité aux additifs et limites d'échelle

1.7. Recyclage chimique : définitions, principes et familles de procédés

Le recyclage chimique des textiles désigne l'ensemble des procédés permettant de séparer, purifier ou transformer les constituants des fibres afin d'obtenir des matières réutilisables. Il se distingue des voies purement mécaniques par son action sur la structure des matériaux, soit par dissolution sélective, soit par rupture contrôlée des chaînes polymères. L'objectif est de récupérer des fractions valorisables, telles que des polymères purifiés, des monomères, des oligomères ou de la cellulose régénérable [35,36].

Deux grandes familles de procédés sont généralement distinguées. La première correspond à la dissolution sélective, qui consiste à utiliser un solvant capable de dissoudre une fraction du textile tout en permettant la séparation des autres composants. Cette approche est particulièrement étudiée pour les mélanges coton/polyester, car elle peut faciliter la récupération de la fraction cellulosique tout en conservant une fraction polyester séparée [37,38]. La deuxième famille correspond à la dépolymérisation, qui vise à rompre les chaînes polymères afin de revenir à des molécules plus simples, réutilisables dans une nouvelle

synthèse. Dans le cas du PET, les voies les plus étudiées sont notamment la glycolyse, l'hydrolyse et la méthanolyse [36,39].

L'application de ces procédés aux textiles réels reste cependant complexe. Contrairement aux déchets homogènes, les vêtements et rebuts textiles peuvent contenir plusieurs fibres, des colorants, des apprêts, des enductions, de l'élasthanne, des coutures ou encore des accessoires métalliques et plastiques. Ces éléments peuvent perturber la sélectivité des réactions, compliquer la séparation des fractions et augmenter les exigences de purification. La performance du recyclage chimique dépend donc fortement de la qualité du tri, de la connaissance de la composition du flux et de l'efficacité des étapes de prétraitement [36,39].

Dans les travaux récents, les procédés chimiques sont souvent envisagés sous forme de chaînes de traitement combinées. La matière textile est d'abord collectée, triée et caractérisée, puis soumise à un prétraitement tel que le désassemblage, le lavage, le broyage ou la décoloration. La dissolution ou la dépolymérisation intervient ensuite, avant une étape finale de purification destinée à obtenir des produits suffisamment propres pour être valorisés. Cette approche séquentielle permet d'adapter le traitement à la nature du déchet et d'améliorer la qualité des matières récupérées.

La figure I.4 illustre cette chaîne simplifiée de recyclage chimique textile. Elle met en évidence que la réussite du procédé ne dépend pas uniquement de la réaction chimique, mais également de la maîtrise des étapes amont et aval : collecte, tri, caractérisation, prétraitement et purification. Le tableau I.5 présente les principales familles de procédés chimiques applicables aux textiles.



Figure I.4. Chaîne simplifiée d'un recyclage chimique textile [35,36,39].

Tableau I.5. Principales familles de procédés de recyclage chimique textile [35–40].

Famille de procédé	Fibres ciblées	Produits obtenus	Points critiques
Dissolution de la cellulose	Coton, viscose, lyocell, mélanges coton/polyester	Pâte cellulosique, cellulose dissoute, fibres régénérées	Choix et récupération du solvant ; maintien du degré de polymérisation ; pureté de la cellulose
Glycolyse du PET	Polyester, polycoton après séparation ou traitement sélectif	BHET et oligomères glycolysés	Choix du catalyseur ; purification ; présence de colorants, additifs ou élasthanne
Hydrolyse du PET	Polyester et textiles riches en PET	Acide téréphtalique et éthylène glycol	Conditions réactionnelles ; corrosion ; séparation et purification des produits
Méthanolyse du PET	Polyester	Diméthyl téréphtalate et éthylène glycol	Utilisation du méthanol ; pression ; sécurité ; purification
Aminolyse / ammonolyse	Polyesters et polyamides selon les systèmes	Amides ou dérivés valorisables	Sélectivité de la réaction ; valorisation des produits obtenus ; débouchés industriels

I.8. Adaptation des procédés aux différentes compositions textiles

Le choix d'un procédé de valorisation dépend directement de la composition du textile. Une fibre cellulosique, une fibre synthétique ou un mélange coton/polyester ne présentent pas les mêmes contraintes chimiques, ni les mêmes possibilités de récupération.

I.8.1. Fibres cellulosiques : coton, viscose et cellulose régénérée

Les fibres cellulosiques, telles que le coton, la viscose et le lyocell, sont constituées principalement de cellulose. Leur valorisation dépend surtout de l'état de la fibre, de son degré de dégradation et de sa pureté. Lorsque les fibres sont trop courtes ou trop altérées pour être

réutilisées par des voies classiques, la dissolution de la cellulose peut permettre d'obtenir une fraction purifiable, ensuite régénérable sous forme de nouvelles fibres artificielles.

Cette stratégie est particulièrement intéressante pour les mélanges coton/polyester. De Silva et al. [41] ont montré que certains liquides ioniques permettent de dissoudre sélectivement la fraction cellulosique dans des mélanges coton/polyester. Cette étude met en évidence l'intérêt des solvants sélectifs pour séparer deux composants de nature différente. Toutefois, la récupération du solvant, son coût et la transposition industrielle restent des points sensibles.

Haslinger et al. [42] ont poursuivi cette logique en étudiant l'upcycling de déchets coton/polyester vers de nouvelles fibres cellulosiques artificielles. Leur travail montre que la valorisation ne doit pas seulement viser la séparation des composants, mais aussi la production d'une matière suffisamment qualitative pour être réutilisée dans des applications textiles. La qualité du flux initial, le degré de polymérisation de la cellulose et la pureté de la fraction récupérée sont donc déterminants.

I.8.2. Fibres synthétiques : cas du polyester/PET

Le polyester, principalement sous forme de polyéthylène téréphtalate (PET), constitue l'une des fibres synthétiques les plus utilisées dans le secteur textile. Sa structure chimique, fondée sur des liaisons ester, permet d'envisager des procédés de dépolymérisation afin de récupérer des molécules réutilisables dans une nouvelle synthèse de PET. Toutefois, le PET textile présente des contraintes spécifiques par rapport aux déchets plus homogènes, comme les bouteilles, car il est souvent associé à des colorants, des additifs, des apprêts ou d'autres fibres [43].

El Darai et al. [43] proposent une revue récente sur le recyclage chimique des déchets textiles en polyester. Les auteurs montrent que les voies de dépolymérisation du PET présentent un potentiel important, mais que leur efficacité dépend fortement de la qualité du flux traité et de la pureté attendue des produits récupérés. Cette référence permet de situer les principaux verrous du recyclage du polyester textile.

Bengtsson et al. [44] ont étudié le recyclage chimique d'un mélange polyester/coton. Leur travail montre que la récupération des constituants du PET est possible dans un textile mélangé, à condition de maîtriser les étapes de réaction et de séparation. Cette étude confirme l'intérêt des procédés chimiques pour les flux mixtes, tout en soulignant la nécessité d'une évaluation économique et environnementale plus approfondie.

Andini et al. [45] ont proposé une approche appliquée à des déchets textiles post-consommation mixtes. Leur procédé combine une glycolyse assistée par micro-ondes, en présence d'un catalyseur à base de ZnO, avec une séparation par solvant. Cette étude montre l'intérêt d'une stratégie en plusieurs étapes pour traiter des flux réels, dont la composition est souvent plus complexe que celle des déchets plastiques conventionnels.

Enking et al. [46] présentent une revue sur les procédés applicables aux textiles contenant du polyester. Leur contribution est utile car elle compare plusieurs voies possibles et montre que le choix du traitement doit dépendre de la composition réelle du déchet, du niveau de qualité recherché et du débouché visé.

I.8.3. Mélanges coton/polyester et textiles complexes

Les mélanges coton/polyester sont très présents dans l'industrie textile, car ils réunissent deux propriétés recherchées : le confort des fibres cellulosiques et la résistance du polyester. Cependant, cette association rend leur recyclage plus délicat que celui des textiles composés d'une seule fibre. En effet, la cellulose et le PET ne réagissent pas de la même manière aux traitements chimiques. Ainsi, lorsqu'un procédé cible uniquement l'une des deux fractions, une partie du déchet risque de rester insuffisamment valorisée [41,42].

Pour répondre à cette difficulté, les stratégies les plus adaptées reposent généralement sur une succession d'étapes. Elles peuvent, par exemple, commencer par la dissolution sélective de la cellulose, se poursuivre par la récupération du polyester, puis intégrer une séparation complémentaire ou une dépolymérisation ciblée. Cette approche progressive permet de mieux exploiter les différentes fractions du textile et de réduire la quantité de résidus difficilement valorisables [42,44].

Loo et al. [47] montrent que les textiles contenant à la fois cellulose et polyester nécessitent des procédés capables de traiter les deux composants du mélange. Leur travail met en évidence que le choix d'une technologie ne peut pas être fait de manière générale, mais doit dépendre de la composition réelle du flux textile, de son état et du niveau de qualité recherché pour les matières récupérées.

Les textiles complexes posent également d'autres difficultés, car ils peuvent contenir des éléments secondaires tels que l'élasthane, les colorants, les apprêts, les enductions ou les accessoires. Choudhury et al. [48] soulignent que cette diversité de composition complique la

séparation des matières et renforce la nécessité d'une caractérisation préalable du déchet avant toute orientation vers une filière de valorisation.

Boondaeng et al. [49] ont étudié une approche combinant un prétraitement chimique et une hydrolyse enzymatique de déchets coton/PET. Leur étude illustre l'intérêt d'associer plusieurs étapes pour améliorer la conversion de certaines fractions. Toutefois, cette voie reste dépendante de paramètres importants, notamment la durée du traitement, le coût des enzymes et la possibilité d'adapter le procédé à des volumes industriels.

Enfin, Vera et al. [50] proposent une analyse technico-économique et environnementale appliquée à la valorisation de déchets issus de la fast fashion. Leur travail rappelle qu'un procédé de recyclage ne peut pas être jugé seulement sur son rendement matière. Il doit aussi être évalué selon ses coûts, sa consommation énergétique, ses impacts environnementaux et les débouchés possibles pour les produits récupérés.

Ainsi, le recyclage des mélanges coton/polyester et des textiles complexes demande une approche à la fois technique et pragmatique. Avant de choisir une technologie, il est nécessaire de connaître précisément la composition du flux, d'identifier les fractions réellement valorisables et d'évaluer si le procédé envisagé peut être appliqué dans des conditions industrielles réalistes.

I.9. Conditions d'intégration industrielle : collecte, tri, qualité et économie

L'intégration du recyclage chimique dans une entreprise textile nécessite une organisation fiable des flux avant toute mise en œuvre technologique. Les déchets pré-consommation sont généralement les plus accessibles, car ils sont produits directement en usine, plus faciles à séparer à la source et mieux traçables. Les déchets post-consommation, en revanche, sont plus hétérogènes et demandent une organisation plus complexe, impliquant la collecte, le tri et la préparation des matières avant traitement [51].

Le tri constitue une étape centrale, car il conditionne l'orientation du déchet vers la filière la plus adaptée. Pour les flux simples, un tri manuel peut être suffisant. Pour les textiles mélangés ou multicomposants, des méthodes plus précises peuvent être nécessaires, notamment la spectroscopie proche infrarouge ou les systèmes de reconnaissance automatisée. Ces outils permettent d'améliorer l'identification des fibres et de limiter les erreurs d'orientation, particulièrement importantes lorsque le procédé choisi dépend fortement de la composition du flux [52,53].

Avant le traitement chimique, une préparation adaptée du déchet est souvent indispensable. Elle peut inclure le désassemblage, le lavage, le broyage, le séchage ou l'élimination de certains éléments perturbateurs. Toutefois, ces étapes doivent être optimisées : une préparation insuffisante peut réduire la qualité des produits récupérés, tandis qu'une préparation excessive peut augmenter les coûts, la consommation d'énergie et l'impact environnemental du procédé [54].

La qualité de la matière obtenue reste déterminante pour la faisabilité industrielle. Les produits récupérés doivent répondre à des critères techniques précis, comme la pureté, la couleur, la stabilité ou les propriétés mécaniques. Un procédé peut être efficace au laboratoire, mais peu pertinent si la matière produite ne trouve pas de débouché économique. Les analyses environnementales rappellent également que le recyclage n'est réellement bénéfique que si la matière recyclée remplace effectivement une matière vierge ou une filière plus impactante [55].

Afin de synthétiser cette démarche, le tableau I.6 présente les principales questions opérationnelles à poser avant l'intégration d'un procédé de recyclage chimique dans une usine textile.

Tableau I.6. Questions opérationnelles pour intégrer le recyclage chimique dans une usine textile [51–55].

Étape	Question clé	Donnée utile	Orientation possible
Collecte	Le flux est-il régulier ?	Quantité, origine, propreté	Séparer les flux pré-consommation et post-consommation
Tri	Quelle est la composition du textile ?	Fibres principales, mélanges, accessoires	Orienter vers la voie de valorisation adaptée
Prétraitement	Quel niveau de préparation est nécessaire ?	Présence d'impuretés, colorants, finitions	Laver, désassembler, broyer ou écarter le flux
Procédé	La technologie est-elle adaptée au flux ?	Rendement, énergie, réactifs, sécurité	Choisir une voie chimique seule ou combinée
Débouché	La matière récupérée est-elle exploitable ?	Qualité, prix, usages possibles	Boucle textile, autre application ou valorisation alternative

Afin de traduire les conditions d'intégration industrielle en une démarche plus opérationnelle, la figure I.5 propose un arbre d'aide à la décision pour orienter les déchets textiles vers la voie de valorisation la plus adaptée. Cette représentation permet de visualiser l'enchaînement des choix à effectuer, depuis l'évaluation du potentiel de réemploi jusqu'à l'identification de la composition du textile et du procédé de recyclage possible. Elle met également en évidence une règle importante : le recyclage chimique ne doit être envisagé qu'après vérification des options prioritaires, notamment la réparation, le réemploi et le recyclage mécanique lorsque ceux-ci permettent une valorisation suffisante.

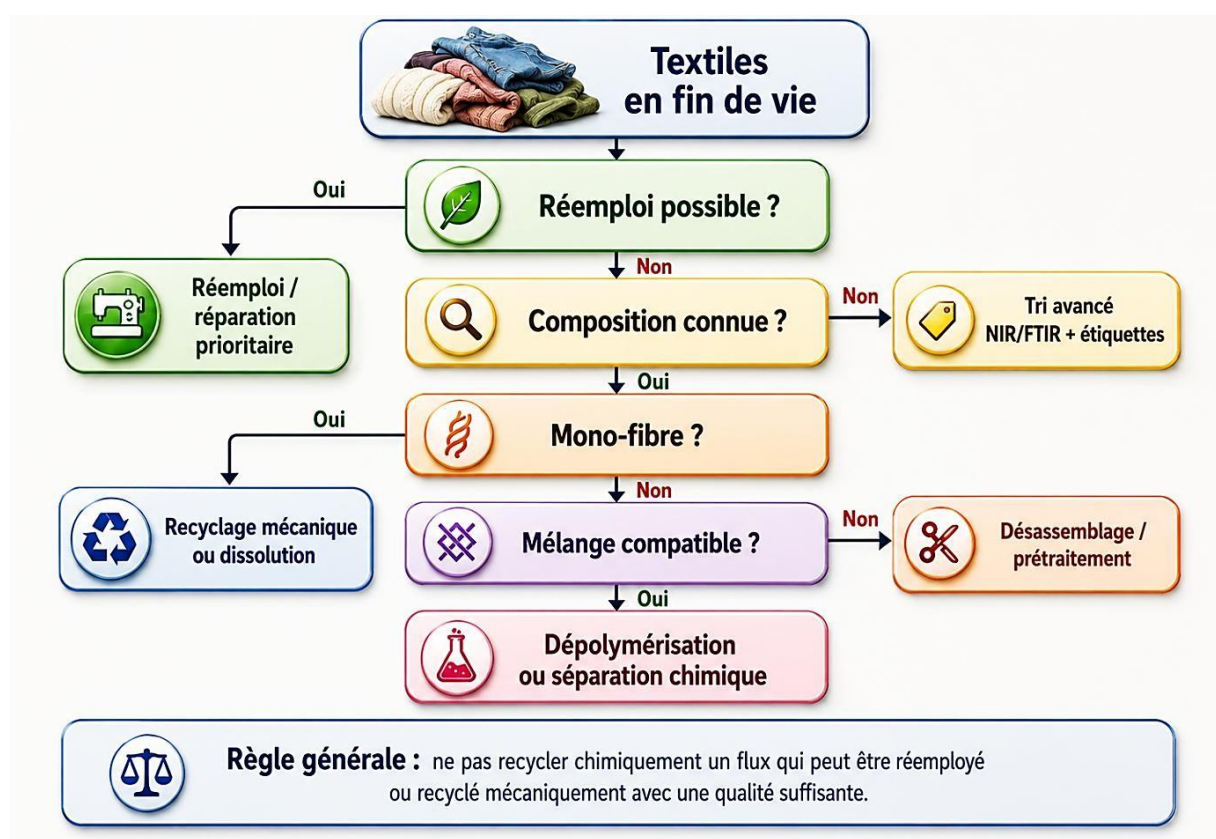


Figure I.5. Arbre d'aide à la décision pour orienter un déchet textile vers la voie de valorisation la plus adaptée, figure élaborée à partir des principes d'orientation des flux textiles décrits par Loo et al. [47].

I.10. Limites, risques et leviers d'amélioration

Le recyclage chimique textile présente un potentiel réel pour valoriser certains déchets difficiles à traiter par des voies conventionnelles. Toutefois, son développement industriel reste soumis à plusieurs limites techniques, environnementales, économiques et organisationnelles. Cette section met en évidence les principaux points de vigilance à considérer avant sa mise en œuvre.

I.10.1. Limites techniques

Les principales limites techniques sont liées à la variabilité des déchets textiles. Les flux réels ne présentent pas toujours une composition stable, ce qui peut influencer la sélectivité des réactions, le rendement de séparation et la qualité des produits récupérés [43,46]. Cette variabilité impose une bonne maîtrise des conditions opératoires afin d'éviter une dégradation excessive des fractions valorisables ou, au contraire, un traitement insuffisant.

La purification constitue également une étape critique. Pour des polymères comme le PET, la possibilité de produire une matière de qualité dépend fortement de la pureté des monomères ou oligomères récupérés. Ainsi, la performance d'un procédé ne doit pas être évaluée uniquement par sa capacité à transformer le déchet, mais aussi par la qualité réelle de la matière obtenue [43].

I.10.2. Limites environnementales et sanitaires

Sur le plan environnemental, le recyclage chimique ne peut pas être considéré automatiquement comme bénéfique. Certains procédés nécessitent de l'énergie, des solvants, des catalyseurs ou des réactifs spécifiques. Leur intérêt dépend donc de la récupération des solvants, de la gestion des effluents, de la consommation énergétique et du remplacement effectif d'une matière vierge [5,6].

Les risques sanitaires doivent aussi être intégrés dès la conception du procédé. La manipulation de produits chimiques impose des mesures de sécurité adaptées, ainsi qu'un contrôle des émissions et des rejets. Une approche par analyse de cycle de vie reste donc nécessaire pour comparer le recyclage chimique à d'autres scénarios de fin de vie [5,6].

I.10.3. Limites économiques et organisationnelles

La viabilité économique constitue un autre frein important. Les procédés chimiques peuvent nécessiter des équipements spécifiques, des étapes de purification coûteuses et un contrôle qualité rigoureux. Leur intérêt dépend aussi de la disponibilité régulière de flux homogènes, du prix des matières vierges et de l'existence d'acheteurs pour les matières recyclées [46,49].

De plus, le passage de l'échelle du laboratoire à l'échelle industrielle peut modifier les rendements, les coûts, les besoins en purification et la consommation énergétique du procédé [43,50]. A cela s'ajoutent les exigences réglementaires, les normes de qualité et l'acceptabilité

du marché, qui conditionnent la possibilité d'utiliser réellement les matières recyclées dans de nouvelles applications textiles [5,6].

Sans données vérifiables sur les flux, les rendements et les impacts, le recyclage chimique peut être présenté de manière excessive comme une solution circulaire, alors que son bénéfice réel doit être démontré.

I.11. Conclusion

Ce chapitre a permis de montrer que le recyclage chimique des textiles s'inscrit dans une réflexion plus large sur la transition vers une industrie textile durable. Face à l'augmentation des déchets, à la consommation importante de ressources et aux limites du modèle linéaire, l'économie circulaire apparaît comme une voie essentielle pour préserver la valeur des matières et réduire les impacts environnementaux.

Le recyclage chimique apparaît ainsi comme une solution complémentaire, particulièrement intéressante pour les flux difficiles à valoriser par les voies classiques, tels que les textiles mélangés, les fibres synthétiques ou les matériaux fortement dégradés. Toutefois, son intérêt ne repose pas uniquement sur sa capacité à transformer un déchet. Il dépend aussi de la qualité du tri, de la connaissance précise de la composition des textiles, de la maîtrise des prétraitements, de la purification des produits obtenus et de l'existence de débouchés industriels réels.

Dans le cas d'une entreprise intégrée comme ALCOVEL/TEXALG, cette réflexion prend une dimension concrète. Avant d'envisager une solution de recyclage chimique, il est nécessaire de commencer par comprendre les flux disponibles : leur origine, leur quantité, leur composition et leur régularité. Cette étape constitue la base d'un choix technologique pertinent et évite de considérer le recyclage chimique comme une réponse automatique à tous les déchets textiles.

Ainsi, ce chapitre met en évidence une idée centrale : la circularité textile ne dépend pas seulement de la technologie, mais aussi de l'organisation, de la qualité des données, du marché et de la capacité à choisir la bonne solution pour le bon flux. Cette base théorique servira d'appui à l'analyse des déchets textiles générés localement et à l'identification des voies de valorisation les plus adaptées au contexte étudié.

I.12. Références Bibliographiques

- [1] Niinimäki, K., Peters, G., Dahlbo, H., Perry, P., Rissanen, T., & Gwilt, A. (2020). The environmental price of fast fashion. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(4), 189–200. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0039-9>.
- [2] Palacios-Mateo, C., Van Der Meer, Y., & Seide, G. (2021). Analysis of the polyester clothing value chain to identify key intervention points for sustainability. *Environmental Sciences Europe*, 33(1), 2. <https://doi.org/10.1186/s12302-020-00447-x>.
- [3] Zamani, B., Sandin, G., & Peters, G. M. (2017). Life cycle assessment of clothing libraries: can collaborative consumption reduce the environmental impact of fast fashion? *Journal of Cleaner Production*, 162, 1368–1375. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.128>.
- [4] Centobelli, P., Abbate, S., Nadeem, S. P., & Garza-Reyes, J. A. (2022). Slowing the fast fashion industry: An all-round perspective. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 38, 100684. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2022.100684>.
- [5] Sandin, G., & Peters, G. M. (2018). Environmental impact of textile reuse and recycling – A review. *Journal of Cleaner Production*, 184, 353–365. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.266>.
- [6] De Oliveira Neto, G. C., Santos, R. a. R., Pinto, L. F. R., Flausino, F. R., De Oliveira, D. E. P., & Seri, M. N. (2024). Innovative circular practices integrating business model for textile industry. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 19. <https://doi.org/10.1177/15589250241226481>.
- [7] Braungart, M., McDonough, W., & Bollinger, A. (2006). Cradle-to-cradle design: creating healthy emissions – a strategy for eco-effective product and system design. *Journal of Cleaner Production*, 15(13–14), 1337–1348. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.08.003>.
- [8] Filho, W. L., Ellams, D., Han, S., Tyler, D., Boiten, V. J., Paço, A., Moora, H., & Balogun, A. (2019). A review of the socio-economic advantages of textile recycling. *Journal of Cleaner Production*, 218, 10–20. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.210>.
- [9] Piribauer, B., & Bartl, A. (2019). Textile recycling processes, state of the art and current developments: A mini review. *Waste Management & Research the Journal for a Sustainable Circular Economy*, 37(2), 112–119. <https://doi.org/10.1177/0734242x18819277>.

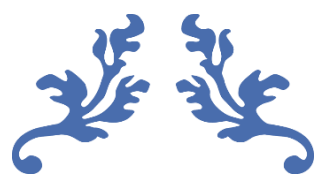
- [10] Piribauer, B., Bartl, A., & Ipsmiller, W. (2021). Enzymatic textile recycling – best practices and outlook. *Waste Management & Research the Journal for a Sustainable Circular Economy*, 39(10), 1277–1290. <https://doi.org/10.1177/0734242x211029167>.
- [11] Moreno-Marrodán, C., Brandi, F., Barbaro, P., & Liguori, F. (2024). Advances in catalytic chemical recycling of synthetic textiles. *Green Chemistry*, 26(24), 11832–11859. <https://doi.org/10.1039/d4gc04768k>.
- [12] Ndagano, U. N., Cahill, L., Smullen, C., Gaughran, J., & Kelleher, S. M. (2025). The current State-of-the-Art of the processes involved in the chemical recycling of textile waste. *Molecules*, 30(2), 299. <https://doi.org/10.3390/molecules30020299>.
- [13] Chambre Algérienne de Commerce et d'Industrie. (s.d.). ALCOVEL / Algérienne des Cotonnades et Velours. Annuaire El Mouchir.
- [14] Filho, W. L., Perry, P., Heim, H., Dinis, M. a. P., Moda, H., Ebhuoma, E., & Paço, A. (2022). An overview of the contribution of the textiles sector to climate change. *Frontiers in Environmental Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.973102>.
- [15] Cura, K., Rintala, N., Kamppuri, T., Saarimäki, E., & Heikkilä, P. (2021). Textile recognition and sorting for recycling at an automated line using near infrared spectroscopy. *Recycling*, 6(1), 11. <https://doi.org/10.3390/recycling6010011>.
- [16] De Falco, F., Di Pace, E., Cocca, M., & Avella, M. (2019). The contribution of washing processes of synthetic clothes to microplastic pollution. *Scientific Reports*, 9(1), 6633. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43023-x>.
- [17] Kant, R. (2012). Textile dyeing industry an environmental hazard. *Natural Science*, 04(01), 22–26. <https://doi.org/10.4236/ns.2012.41004>.
- [18] Shirvanimoghaddam, K., Motamed, B., Ramakrishna, S., & Naebe, M. (2020). Death by waste: Fashion and textile circular economy case. *The Science of the Total Environment*, 718, 137317. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137317>.
- [19] Subramanian, K., Chopra, S. S., Cakin, E., Li, X., & Lin, C. S. K. (2020). Environmental life cycle assessment of textile bio-recycling – valorizing cotton-polyester textile waste to pet fiber and glucose syrup. *Resources Conservation and Recycling*, 161, 104989. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104989>.
- [20] Chen, X., Memon, H. A., Wang, Y., Marriam, I., & Tebyetekerwa, M. (2021). Circular economy and sustainability of the clothing and textile industry. *Materials Circular Economy*, 3(1). <https://doi.org/10.1007/s42824-021-00026-2>.

- [21] Koszewska, M. (2018). Circular economy — Challenges for the textile and clothing industry. *Autex Research Journal*, 18(4), 337–347. <https://doi.org/10.1515/aut-2018-0023>.
- [22] Ribul, M., Lanot, A., Pisapia, C. T., Purnell, P., McQueen-Mason, S. J., & Baurley, S. (2021). Mechanical, chemical, biological: Moving towards closed-loop bio-based recycling in a circular economy of sustainable textiles. *Journal of Cleaner Production*, 326, 129325. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129325>.
- [23] Jacometti, V. (2019). Circular economy and waste in the fashion industry. *Laws*, 8(4), 27. <https://doi.org/10.3390/laws8040027>.
- [24] Ramírez-Escamilla, H. G., Martínez-Rodríguez, M. C., Padilla-Rivera, A., Domínguez-Solís, D., & Campos-Villegas, L. E. (2024). Advancing toward Sustainability: A Systematic review of circular economy strategies in the textile industry. *Recycling*, 9(5), 95. <https://doi.org/10.3390/recycling9050095>.
- [25] Bhatnagar, A., Manivannan, A. C., & Niinimäki, K. (2025). How Policies are Shaping Longer-Lasting Textiles in Europe. *Proceedings of the 6th Product Lifetimes and the Environment Conference (PLATE2025)*, 6. <https://doi.org/10.54337/plate2025-10325>.
- [26] Shamsuzzaman, M., Islam, M., Mamun, M. a. A., Rayyaan, R., Sowrov, K., Islam, S., & Sayem, A. S. M. (2025). Fashion and textile waste management in the circular economy: A systematic review. *Cleaner Waste Systems*, 11, 100268. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2025.100268>.
- [27] Trujillo, C. M., Campos, N. S., Segal, D. C., & Linden, K. G. (2024). Heat input optimization for the ignition of self-sustained smoldering remediation of contaminated soils using concentrated solar power. *Cleaner Waste Systems*, 8, 100143. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2024.100143>.
- [28] Papile, F., & Del Curto, B. (2025). Textile Materials Information for digital Product passport implementation in the textile and clothing ecosystem: A review on the role of raw fibers in a substantial transition. *Sustainability*, 17(19), 8804. <https://doi.org/10.3390/su17198804>.
- [29] Rosson, L., Wang, X., & Byrne, N. (2023). Investigating how the dye colour is impacted when chemically separating polyester-cotton blends. *Journal of the Textile Institute*, 115(4), 656–666. <https://doi.org/10.1080/00405000.2023.2201977>.
- [30] Pensupa, N., Leu, S., Hu, Y., Du, C., Liu, H., Jing, H., Wang, H., & Lin, C. S. K. (2017). Recent trends in sustainable textile waste recycling methods: Current situation and future

- prospects. *Topics in Current Chemistry*, 375(5), 76. <https://doi.org/10.1007/s41061-017-0165-0>.
- [31] Jia, F., Yin, S., Chen, L., & Chen, X. (2020). The circular economy in the textile and apparel industry: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 259, 120728. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120728>.
- [32] Niinimäki, K., & Hassi, L. (2011). Emerging design strategies in sustainable production and consumption of textiles and clothing. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.04.020>.
- [33] Ennaert, T., Van Aelst, J., Dijkmans, J., De Clercq, R., Schutyser, W., Dusselier, M., Verboekend, D., & Sels, B. F. (2015). Potential and challenges of zeolite chemistry in the catalytic conversion of biomass. *Chemical Society Reviews*, 45(3), 584–611. <https://doi.org/10.1039/c5cs00859j>.
- [34] Tournier, V., Topham, C. M., Gilles, A., David, B., Folgoas, C., Moya-Leclair, E., Kamionka, E., Desrousseaux, M., Texier, H., Gavalda, S., Cot, M., Guémard, E., Dalibey, M., Nomme, J., Cioci, G., Barbe, S., Chateau, M., André, I., Duquesne, S., & Marty, A. (2020). An engineered PET depolymerase to break down and recycle plastic bottles. *Nature*, 580(7802), 216–219. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2149-4>.
- [35] Faghih, E., Saki, Z., & Moore, M. (2025). A Systematic Literature Review—AI-Enabled Textile Waste Sorting. *Sustainability*, 17(10), 4264. <https://doi.org/10.3390/su17104264>.
- [36] Bartolome, L., Imran, M., Gyoo, B., A, W., & Hyun, D. (2012). Recent developments in the chemical recycling of PET. In *InTech eBooks*. <https://doi.org/10.5772/33800>.
- [37] Xia, G., Han, W., Xu, Z., Zhang, J., Zhang, J., Kong, F., Zhang, J., Zhang, J., Zhang, X., & Jia, F. (2021). Complete recycling and valorization of waste textiles for value-added transparent films via an ionic liquid. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 106182. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106182>.
- [38] Yousef, S., Tatariants, M., Tichonovas, M., Kliucininkas, L., Lukošūtė, S., & Yan, L. (2020). Sustainable green technology for recovery of cotton fibers and polyester from textile waste. *Journal of Cleaner Production*, 254, 120078. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120078>.
- [39] Andini, E., Bhalode, P., Gantert, E., Sadula, S., & Vlachos, D. G. (2024). Chemical recycling of mixed textile waste. *Science Advances*, 10(27), eado6827. <https://doi.org/10.1126/sciadv.ado6827>.

- [40] Cao, X., Yue, L., Lian, F., Wang, C., Cheng, B., Lv, J., Wang, Z., & Xing, B. (2020). CuO nanoparticles doping recovered the photocatalytic antialgal activity of graphitic carbon nitride. *Journal of Hazardous Materials*, 403, 123621. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123621>.
- [41] De Silva, R., Wang, X., & Byrne, N. (2014). Recycling textiles: the use of ionic liquids in the separation of cotton polyester blends. *RSC Advances*, 4(55), 29094–29098. <https://doi.org/10.1039/c4ra04306e>.
- [42] Haslinger, S., Hummel, M., Anghelescu-Hakala, A., Määtänen, M., & Sixta, H. (2019). Upcycling of cotton polyester blended textile waste to new man-made cellulose fibers. *Waste Management*, 97, 88–96. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.07.040>.
- [43] Darai, T. E., Ter-Halle, A., Blanzat, M., Despras, G., Sartor, V., Bordeau, G., Lattes, A., Franceschi, S., Cassel, S., Chouini-Lalanne, N., Perez, E., Déjugnat, C., & Garrigues, J. (2024). Chemical recycling of polyester textile wastes: shifting towards sustainability. *Green Chemistry*, 26(12), 6857–6885. <https://doi.org/10.1039/d4gc00911h>.
- [44] Bengtsson, J., Peterson, A., Idström, A., De La Motte, H., & Jedvert, K. (2022). Chemical Recycling of a Textile Blend from Polyester and Viscose, Part II: Mechanism and Reactivity during Alkaline Hydrolysis of Textile Polyester. *Sustainability*, 14(11), 6911. <https://doi.org/10.3390/su14116911>.
- [45] Peterson, A., Wallinder, J., Bengtsson, J., Idström, A., Bialik, M., Jedvert, K., & De La Motte, H. (2022). Chemical Recycling of a Textile Blend from Polyester and Viscose, Part I: Process Description, Characterization, and Utilization of the Recycled Cellulose. *Sustainability*, 14(12), 7272. <https://doi.org/10.3390/su14127272>.
- [46] Enking, J., Becker, A., Schu, G., Gausmann, M., Cucurachi, S., Tukker, A., & Gries, T. (2025). Recycling processes of polyester-containing textile waste—A review. *Resources Conservation and Recycling*, 219, 108256. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108256>.
- [47] Loo, S., Yu, E., & Hu, X. (2023). Tackling critical challenges in textile circularity: A review on strategies for recycling cellulose and polyester from blended fabrics. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(5), 110482. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110482>.
- [48] Choudhury, K., Tsianou, M., & Alexandridis, P. (2024). Recycling of blended fabrics for a circular economy of textiles: separation of cotton, polyester, and elastane fibers. *Sustainability*, 16(14), 6206. <https://doi.org/10.3390/su16146206>.

- [49] Boondaeng, A., Keabpimai, J., Srichola, P., Vaithanomsat, P., Trakunjae, C., & Niyomvong, N. (2023). Optimization of Textile Waste Blends of Cotton and PET by Enzymatic Hydrolysis with Reusable Chemical Pretreatment. *Polymers*, 15(8), 1964. <https://doi.org/10.3390/polym15081964>.
- [50] Vera, R. E., Vivas, K. A., Forfora, N., Marquez, R., Urdaneta, I., Frazier, R., De Assis, C. A., De Assis, T., Treasure, T., Farrell, M., Ankeny, M., Saloni, D., Pal, L., Jameel, H., & Gonzalez, R. (2024). From waste to advanced resource: Techno-economic and life cycle assessment behind the integration of polyester recycling and glucose production to valorize fast fashion garments. *Chemical Engineering Journal*, 500, 156895. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.156895>.
- [51] Hawley, J. M. (2006). Digging for Diamonds: A Conceptual framework for understanding reclaimed Textile products. *Clothing and Textiles Research Journal*, 24(3), 262–275. <https://doi.org/10.1177/0887302x06294626>.
- [52] Abagnato, S., Rigamonti, L., & Grosso, M. (2024). Life cycle assessment applications to reuse, recycling and circular practices for textiles: A review. *Waste Management*, 182, 74–90. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.04.016>.
- [53] Riba, J., Cantero, R., Riba-Mosoll, P., & Puig, R. (2022b). Post-Consumer Textile Waste Classification through Near-Infrared Spectroscopy, Using an Advanced Deep Learning Approach. *Polymers*, 14(12), 2475. <https://doi.org/10.3390/polym14122475>.
- [54] Du, W., Zheng, J., Li, W., Liu, Z., Wang, H., & Han, X. (2022). Efficient Recognition and Automatic Sorting Technology of Waste Textiles Based on Online Near infrared Spectroscopy and Convolutional Neural Network. *Resources Conservation and Recycling*, 180, 106157. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106157>.
- [55] Becker, A., Datko, A., Kroell, N., Küppers, B., Greiff, K., & Gries, T. (2024). Near-infrared-based sortability of polyester-containing textile waste. *Resources Conservation and Recycling*, 206, 107577. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107577>.
- [56] Sandin, G., Lidfeldt, M., & Nellström, M. (2025). Exploring the environmental impact of textile recycling in Europe: A Consequential Life Cycle assessment. *Sustainability*, 17(5), 1931. <https://doi.org/10.3390/su17051931>.



CHAPITRE II

MATERIELS ET METHODES



I.1. Introduction générale : textile, environnement et circularité

Ce chapitre est consacré à la présentation du matériel utilisé et de la procédure expérimentale adoptée pour la valorisation d'un déchet textile, depuis son tri jusqu'à son application dans l'élimination du bleu de méthylène en solution aqueuse.

II.1. Collecte

Identifier les sources de production des déchets textiles et à localiser les points où ces résidus sont générés. Dans le cadre de ce travail, les déchets utilisés proviennent de l'industrie textile ALCOVEL située dans la zone industrielle d'Akbou, wilaya de Béjaia, Algérie. Cette entreprise est spécialisée dans le secteur du textile et de l'habillement, notamment dans la production de cotonnades et de velours.

Les déchets textiles se présentent initialement sous forme de balles contenant des fragments de différentes formes et couleurs. Pour cette étude, seuls les déchets constitués de coton blanc à 100 % ont été sélectionnés. Chaque lot collecté a été identifié à l'aide d'étiquettes afin d'assurer la traçabilité des échantillons. Les informations mentionnées comprennent notamment la date de collecte, la source du textile et le lieu de récupération [1].

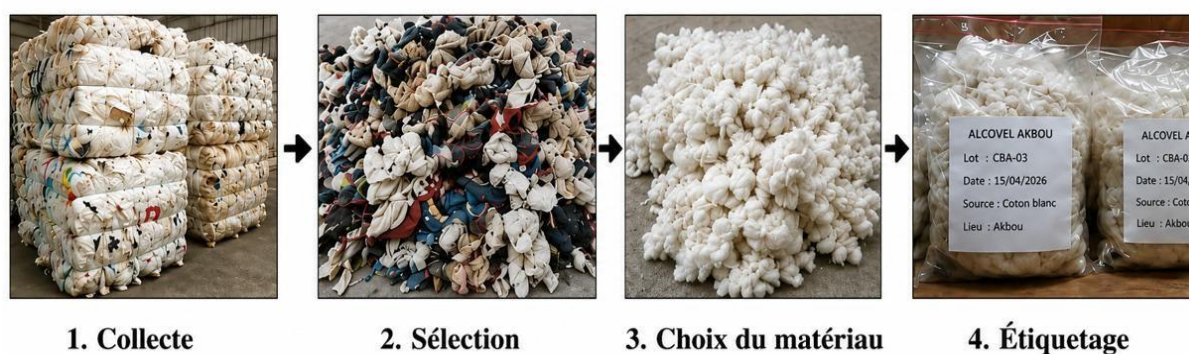


Figure II.1. Principales étapes de collecte et de préparation des déchets textiles.

II.2. Tri

Le tri constitue une étape essentielle dans la préparation des déchets textiles. Il consiste d'abord à séparer les déchets selon leur état général, leur couleur et leur degré de propreté. Ensuite, un tri plus précis est réalisé afin d'identifier la nature des fibres textiles, notamment le coton et le polyester. Cette identification peut être effectuée à partir des étiquettes présentes sur les déchets

ou par observation des caractéristiques physiques des fibres, telles que la texture et l'aspect général. Dans le cadre de cette étude, seuls les déchets constitués de coton blanc à 100 % ont été retenus pour la suite du traitement.



Figure II.2. Tri des déchets textiles selon la nature et la couleur des fibres.

II.2.1. Test de combustion pour l'identification des fibres textiles

Les fibres naturelles, comme le coton, se caractérisent généralement par une combustion rapide, accompagnée d'une odeur similaire à celle du papier brûlé et par la formation d'une cendre fine. En revanche, le polyester se distingue par la formation d'un résidu solide et compact après combustion. L'application de ce protocole permet ainsi de caractériser les textiles collectés et d'identifier la nature des fibres qui les composent [2].



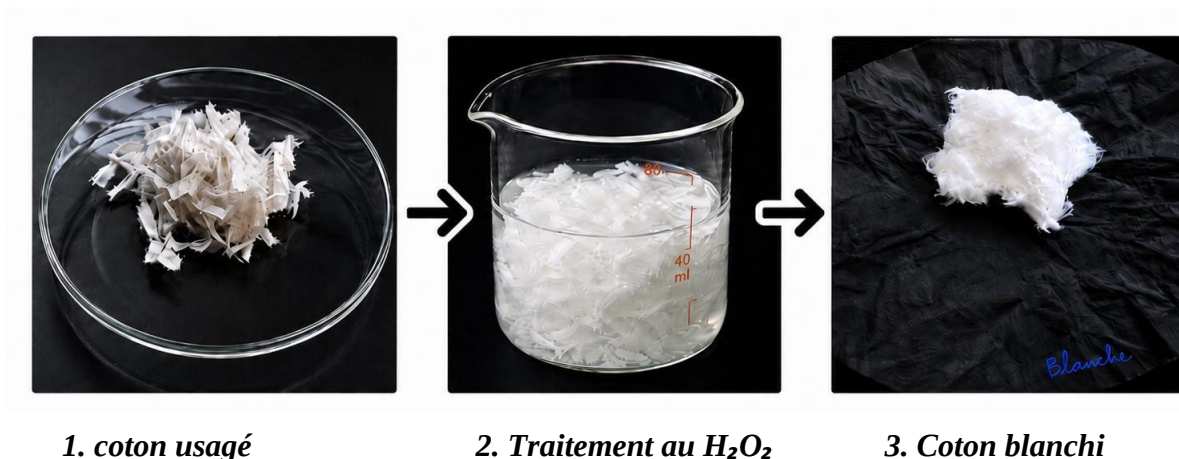
Figure II.3. Test de combustion du coton et du polyester.

II.3. Préparation d'un adsorbant textile par traitement chimique

II.3.1. Blanchiment

Le blanchiment est un traitement chimique destiné à éliminer les impuretés et les pigments afin d'obtenir un textile blanc et homogène. Le peroxyde d'hydrogène H_2O_2 est couramment utilisé comme agent oxydant en raison de son efficacité et de son impact environnemental limité.

Pour réaliser cette opération, nous avons adopté le protocole décrit par Fatin Azzahra et al. [3] Selon ce protocole, 3 g d'échantillon de textile blanc sont pesés, puis immergés dans 150 ml d'une solution de peroxyde d'hydrogène à 30 % pendant une heure. Après le traitement, l'échantillon est lavé et filtré, d'abord avec de l'eau du robinet, puis avec de l'eau distillée jusqu'à l'obtention d'un pH neutre compris entre 6,5 et 7. Enfin, l'échantillon est séché dans une étuve à 40 °C pendant 24 h.



1. coton usagé

2. Traitement au H_2O_2

3. Coton blanchi

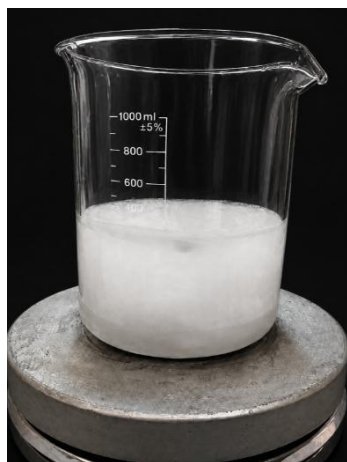
Figure II.4. Étapes de transformation d'un déchet textile blanchi en matériau fibreux

II.3.2 L'hydrolyse acide

Le coton est principalement constitué de cellulose, un polymère formé d'unités répétitives de glucose reliées par des liaisons β -1,4-glycosidiques. L'hydrolyse acide consiste à rompre partiellement ces liaisons sous l'action de l'eau, en présence d'un acide jouant le rôle de catalyseur [4].

Dans cette étude, l'hydrolyse a été réalisée avec deux acides : l'acide chlorhydrique HCl à différentes concentrations de 10, 20, 30, 40, 60 et 80 %, et l'acide phosphorique H_3PO_4 à 10, 20, 30 et 40 %. Cette étape vise à modifier la structure de la cellulose et à faciliter la transformation du déchet textile en matériau valorisable. Pour chaque essai, 1 g d'échantillon de coton est introduit dans une solution acide préparée avec de l'eau distillée. Le mélange est agité pendant 90 min à 250 tr/min. Ensuite, 300 ml d'eau distillée refroidie sont ajoutés afin de

ralentir la réaction. Après 30 min de repos, l'échantillon est lavé et filtré jusqu'à l'obtention d'un pH neutre compris entre 6,5 et 7, puis séché à 50 °C pendant 24 h.



1. Hydrolyse acide



2. Lavage-filtration



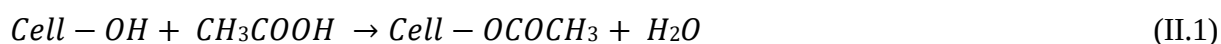
3. Cellulose hydrolysée

Figure II.5. Etapes suivies pour l'obtention de cellulose.

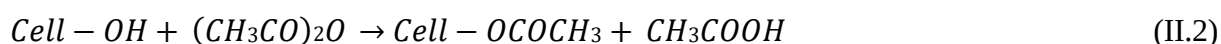
II.3.3 Acétylation

L'acétylation est une modification chimique de la cellulose qui consiste à substituer une partie des groupements hydroxyle (-OH) des chaînes cellulosiques par des groupements acétyle (-OCOCH₃). Cette transformation réduit partiellement le caractère hydrophile de la cellulose et peut améliorer sa stabilité ainsi que sa compatibilité avec les composés organiques. Dans ce travail, l'acétylation a été appliquée au coton préalablement hydrolysé afin d'obtenir un dérivé cellulosique de type acétate de cellulose, dans une approche de valorisation chimique des déchets textiles en coton [5–8].

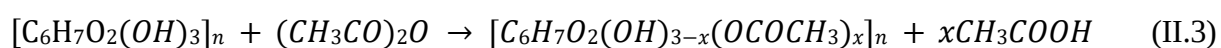
Le mécanisme réactionnel repose sur l'activation partielle des fonctions hydroxyle de la cellulose en milieu basique, ce qui favorise leur réaction avec l'espèce acétylante. Il se forme alors une liaison ester entre la chaîne cellullosique et le groupement acétyle, selon le schéma simplifié suivant :



Dans les procédés classiques d'acétylation, l'anhydride acétique est souvent utilisé comme agent acétylant plus réactif :



ou, pour une unité cellullosique partiellement substituée :



Pour réaliser cette opération, 1,00 g de coton hydrolysé sec a été introduit dans un bécher contenant 35 mL d'eau distillée, puis 2,3 mL d'acide acétique glacial ont été ajoutés progressivement. Le mélange a été maintenu sous agitation magnétique à température ambiante pendant 20 min, afin d'assurer une bonne dispersion du coton hydrolysé et de favoriser l'imprégnation du réactif dans les fibres cellulosesiques [5].

Après cette étape d'homogénéisation, le pH du milieu réactionnel a été ajusté à pH = 8 par addition goutte à goutte d'une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium NaOH sous agitation continue. Ce milieu légèrement basique permet d'activer les groupements hydroxyle de la cellulose et de favoriser leur réaction avec les espèces acétylantes présentes dans le milieu réactionnel.

Le mélange a ensuite été chauffé à 40 °C sous agitation magnétique pendant 1 h. Cette température modérée permet de favoriser la réaction d'acétylation tout en limitant la dégradation excessive de la cellulose. À la fin du temps de réaction, le mélange a été légèrement refroidi, puis la réaction a été arrêtée par addition goutte à goutte d'une solution d'acide chlorhydrique HCl jusqu'à l'obtention d'un pH acide, compris entre 2 et 3. Cette acidification permet de stopper la réaction et de neutraliser le milieu.

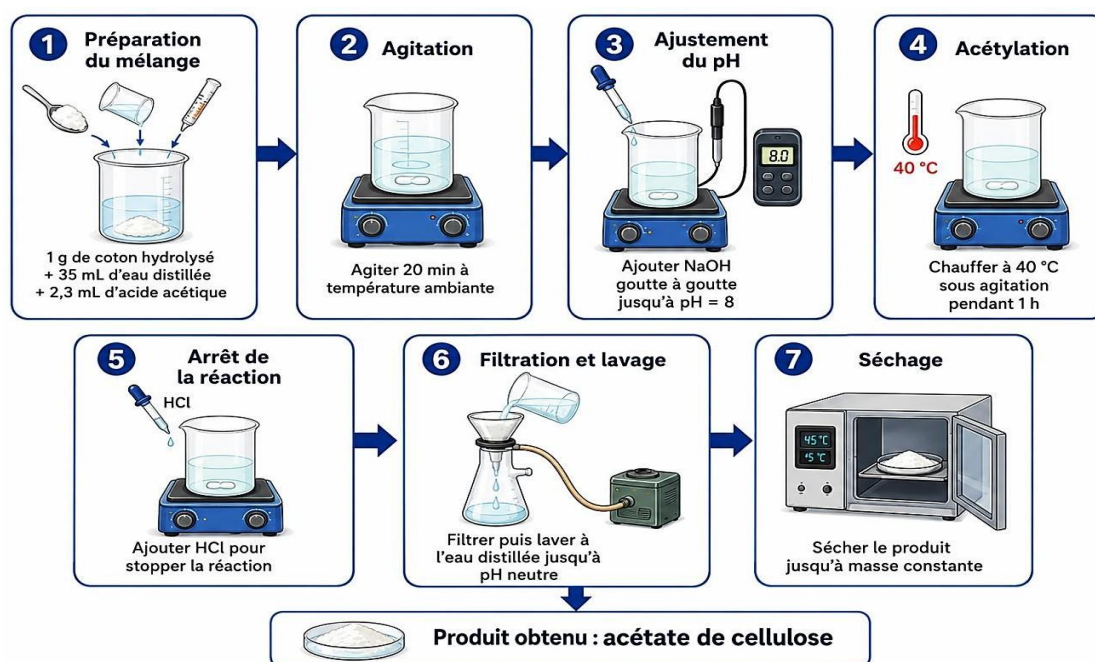


Figure II.6. Schéma explicatif de l'acétylation du coton hydrolysé.

Le solide obtenu a ensuite été récupéré par filtration sous vide sur entonnoir Büchner, puis lavé abondamment avec de l'eau distillée, d'abord chaude puis froide, jusqu'à l'obtention d'un filtrat

de pH neutre, proche de 7. Le produit final a été séché à l'étuve à 40–50 °C jusqu'à masse constante, puis conservé dans un dessiccateur avant les analyses ultérieures. Le produit obtenu se présente généralement sous forme d'un solide blanc à crème, correspondant à un matériau cellulosique acétylé destiné aux étapes de caractérisation et aux essais d'adsorption.

II.4. pH au point de charge nulle (pH_{pzc})

Afin de déterminer le pH au point de charge nulle (pH_{pzc}) des adsorbants obtenus, des doses de 0,1 g de chaque échantillon sont introduites dans des béchers contenant 50 mL d'une solution de NaCl. Le pH initial de chaque solution est ajusté à différentes valeurs à l'aide de solutions de HCl ou de NaOH. Les suspensions sont ensuite agitées mécaniquement pendant 24 h, puis le pH final est mesuré.

Le pH au point de charge nulle, noté pH_{pzc} , correspond à la valeur de pH pour laquelle la charge globale de la surface du matériau est nulle. Il est déterminé graphiquement en traçant la variation Δ , calculée selon la relation $\Delta pH = pH_{final} - pH_{initial}$, en fonction du pH initial. Le pH_{pzc} correspond au point d'intersection de la courbe avec l'axe $\Delta pH = 0$ [9,10].

II.5. Évaluation des fibres comme adsorbant pour l'élimination du bleu de méthylène

Les expériences d'adsorption du bleu de méthylène ont été réalisées en mode discontinu. Pour chaque essai, 50 ml de solution de bleu de méthylène, préparée à différentes concentrations initiales, notamment 20 et 40 ppm, sont introduites dans des béchers. Une masse de 0,1 g d'échantillon adsorbant est ensuite ajoutée à chaque solution.

Le pH des solutions est ajusté à des valeurs comprises entre 4 et 7, à l'aide d'acide sulfurique pour les milieux acides et de NaOH pour les milieux basiques. Les suspensions sont maintenues sous agitation pendant 1 h et on laisse 24h. Des prélèvements sont effectués toutes les 10 min afin de suivre l'évolution de la concentration du bleu de méthylène par mesure de l'absorbance à 664 nm à l'aide d'un spectrophotomètre UV-Visible de marque SHIMADZU.

II.5.1 Principe de la spectrophotomètre UV-Visible

La spectrophotométrie UV-Visible est une technique d'analyse optique basée sur la mesure de l'absorption d'un rayonnement électromagnétique par une espèce chimique en solution. Elle

exploite les transitions électroniques des molécules ou des ions lorsqu'ils absorbent une énergie lumineuse dans le domaine ultraviolet, généralement compris entre 200 et 400 nm, ou dans le domaine visible, compris entre 400 et 800 nm [11]. Cette méthode est largement utilisée en analyse quantitative, notamment pour déterminer la concentration résiduelle d'un polluant coloré en solution après un traitement d'adsorption.

Le principe repose sur le passage d'un faisceau lumineux monochromatique à travers une cuve contenant l'échantillon à analyser. Une partie du rayonnement incident est absorbée par les molécules présentes dans la solution, tandis que le reste est transmis vers un détecteur. Le spectrophotomètre mesure alors l'intensité lumineuse incidente (I_0) et l'intensité transmise (I), puis calcule l'absorbance (A) selon la relation suivante [12] :

$$A = \log \left(\frac{I_0}{I} \right) \quad (\text{II.4})$$

Dans des conditions expérimentales appropriées, l'absorbance est proportionnelle à la concentration de l'espèce absorbante selon la loi de Beer-Lambert [12,13] :

$$A = \varepsilon \times l \times C \quad (\text{II.5})$$

où (A) représente l'absorbance, (ε) le coefficient d'absorption molaire, (l) le trajet optique de la cuve généralement égal à 1 cm, et (C) la concentration de l'espèce analysée. Cette relation est valable dans un domaine de concentrations diluées, pour lequel la courbe d'étalonnage reste linéaire. Des écarts à la linéarité peuvent apparaître lorsque les solutions sont trop concentrées, lorsque le milieu est trouble ou lorsque des interactions moléculaires modifient l'absorption [13].

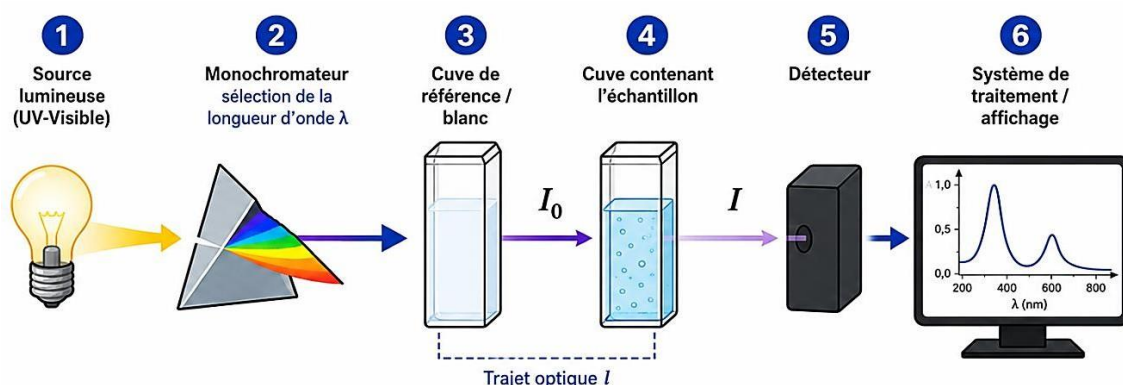


Figure II.7. Principe de la spectrophotométrie UV-Visible.

Dans le cadre des essais d'adsorption, la spectrophotométrie UV-Visible permet de suivre l'évolution de la concentration du colorant dans la solution au cours du temps. Après contact

entre l'adsorbant et la solution polluée, l'échantillon est séparé du solide par filtration ou centrifugation, puis l'absorbance du surnageant est mesurée à la longueur d'onde maximale d'absorption du colorant (λ_{max}). La concentration résiduelle est ensuite déterminée à partir d'une courbe d'étalonnage préalablement établie. Cette méthode est appréciée pour sa simplicité, sa rapidité, sa sensibilité et son adaptation au suivi des polluants organiques colorés en milieu aqueux [14].

II.5.2 Courbe d'étalonnage du bleu de méthylène

La courbe d'étalonnage du bleu de méthylène a été établie à partir de solutions de concentrations connues préparées par dilution d'une solution mère. L'absorbance de chaque solution a été mesurée à 664 nm à l'aide d'un spectrophotomètre UV-Visible. Les valeurs obtenues ont permis de tracer la courbe reliant l'absorbance à la concentration, utilisée ensuite pour déterminer les concentrations résiduelles du bleu de méthylène après adsorption.

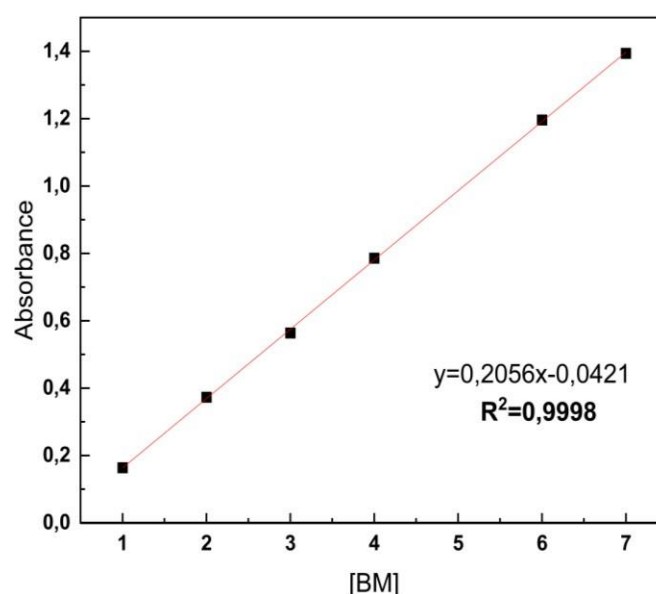


Figure II.8. Courbe d'étalonnage du bleu de méthylène.

II.6. Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter l'ensemble de la démarche expérimentale suivie pour la valorisation d'un déchet textile en coton en matériau adsorbant. La méthodologie adoptée repose sur une succession d'étapes complémentaires, allant de la collecte et du tri des déchets textiles jusqu'à leur transformation chimique par blanchiment, hydrolyse acide et acétylation. Ces traitements ont été choisis afin d'améliorer l'homogénéité du matériau, de modifier sa

structure cellulosique et de favoriser le développement de fonctions de surface susceptibles d'intervenir dans les mécanismes d'adsorption.

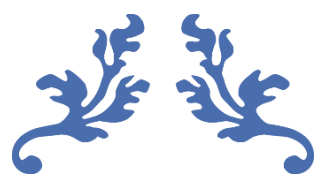
La détermination du pH au point de charge nulle constitue une étape importante pour mieux comprendre le comportement de surface des adsorbants préparés en fonction du pH du milieu. De même, les essais d'adsorption réalisés en mode discontinu permettent d'évaluer l'aptitude des matériaux obtenus à éliminer le bleu de méthylène, utilisé comme polluant organique modèle. Le recours à la spectrophotométrie UV-Visible, associé à une courbe d'étalonnage, assure un suivi quantitatif fiable de la concentration résiduelle du colorant au cours du traitement.

Ainsi, les protocoles décrits dans ce chapitre constituent la base expérimentale nécessaire pour interpréter les performances des adsorbants élaborés. Les résultats issus de ces essais, ainsi que l'influence des paramètres opératoires sur l'élimination du bleu de méthylène, seront présentés et discutés dans le chapitre suivant.

II.7. Références Bibliographiques

- [1] El Mouchir., ALCOVEL / Algérienne des Cotonnades et Velours. Zone industrielle, RN n°26, Akbou, BP 63, Béjaïa, Algérie. Secteur : textile et habillement, tissus velours, produits de filature de coton et fibres synthétiques.
- [2] AATCC., (2021). AATCC TM20-2021: Test Method for Fiber Analysis: Qualitative. American Association of Textile Chemists and Colorists, Research Triangle Park, NC, USA.
- [3] Rashid, M., Gafur, M. A., Sharafat, M. K. Minami, H., Miah, M. A. J., & Ahmad, H. (2017). Biocompatible microcrystalline cellulose particles from cotton wool and magnetization via a simple in situ co-precipitation method. Carbohydrate polymers, 170, 72–79. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.04.059>.
- [4] Bolat, F., Ghitman, J., Necolau, M. I., Vasile, E., & Iovu, H. (2023). A comparative study of the impact of the bleaching method on the production and characterization of cotton-origin nanocrystalline cellulose by acid and enzymatic hydrolysis. Polymers, 15, 3446. <https://doi.org/10.3390/polym15163446>.
- [5] Huda, E., Rahmi, R., & Khairan, K. (2019). Preparation and characterization of cellulose acetate from cotton. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 364(1), 012021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/364/1/012021>.

- [6] Homem, N. C., & Amorim, M. T. P. (2020). Synthesis of cellulose acetate using as raw material textile wastes. *Materials Today Proceedings*, 31, S315–S317. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.494>.
- [7] Sun, X., Lu, C., Zhang, W., Tian, D., & Zhang, X. (2013). Acetone-soluble cellulose acetate extracted from waste blended fabrics via ionic liquid catalyzed acetylation. *Carbohydrate Polymers*, 98(1), 405–411. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.05.089>.
- [8] Fischer, S., Thümmel, K., Volkert, B., Hettrich, K., Schmidt, I., & Fischer, K. (2008). Properties and applications of cellulose acetate. *Macromolecular Symposia*, 262(1), 89–96. <https://doi.org/10.1002/masy.200850210>.
- [9] Brahmi, A., Ziani, S., AitAli, S., Khireddine, H., & Luukkonen, T. (2024). Preparation of porous hydroxyapatite–metakaolin geopolymer granules for adsorption applications using polyethylene glycol as porogen agent and sodium dodecyl sulfate as anionic surfactant. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 43262–43280. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34001-6>.
- [10] Ziani, S., AitAli, S., Brahmi, A., Lakehal, Y. Z., Zaabar, A., Meski, S., Boudrahem, F., Khireddine, H., Ghernaout, D., Mukalazi, H., & Belaadi, A. (2026). A sustainable bioadsorbent approach for tetracycline adsorption from aqueous solutions using calcined chicken bone waste: Optimization via response surface methodology. *Results in Engineering*, 29, 109169. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.109169>.
- [11] Perkampus, H. (1992). UV-VIS Spectroscopy and its applications. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-77477-5>.
- [12] Swinehart, D. F. (1962). The Beer-Lambert Law. *Journal of Chemical Education*, 39(7), 333. <https://doi.org/10.1021/ed039p333>.
- [13] Mayerhöfer, T. G., & Popp, J. (2018). Beer’s Law – Why absorbance depends (Almost) linearly on concentration. *ChemPhysChem*, 20(4), 511–515. <https://doi.org/10.1002/cphc.201801073>.
- [14] Guo, Y., Liu, C., Ye, R., & Duan, Q. (2020). Advances on water quality detection by UV-VIS spectroscopy. *Applied Sciences*, 10(19), 6874. <https://doi.org/10.3390/app10196874>.



CHAPITRE III

RESULTATS ET DISCUSSION



Ce chapitre présente et discute les résultats obtenus lors de la valorisation chimique des déchets textiles. L'identification des fibres par le test de combustion a d'abord permis de distinguer les matériaux cellulosiques des fibres synthétiques, étape indispensable avant le choix du traitement approprié. Les propriétés de surface ont ensuite été évaluées à travers la détermination du pH au point de charge nulle (pH_{PCZ}), tandis que les performances d'adsorption ont été étudiées vis-à-vis du bleu de méthylène (BM), un colorant cationique fréquemment utilisé comme molécule modèle. Cette analyse permet de situer le recyclage chimique du coton dans une démarche de valorisation à double intérêt : la réduction des déchets textiles et la production d'adsorbants destinés au traitement des eaux colorées.

III.1. Test de combustion pour l'identification des fibres textiles

Le test de combustion constitue une méthode rapide et qualitative pour orienter l'identification des fibres textiles. Il repose sur plusieurs observations complémentaires : le comportement au contact de la flamme, la poursuite ou non de la combustion après retrait de la flamme, l'odeur dégagée et la nature du résidu formé. Même s'il ne remplace pas une caractérisation instrumentale, ce test fournit une première indication fiable pour différencier une fibre cellulosique, comme le coton, d'une fibre thermoplastique, comme le polyester.

Dans le cas du coton 100 %, la combustion rapide et continue, associée à une odeur de papier brûlé et à la formation d'une cendre grise, légère et friable, confirme le caractère cellulosique de l'échantillon. Ce comportement est cohérent avec la structure polysaccharidique du coton, riche en liaisons glycosidiques et en groupements hydroxyle, qui favorisent la dégradation thermique avec production de cendres peu compactes.

Le polyester présente un comportement nettement différent : il fond avant de brûler, dégage une odeur chimique et laisse après refroidissement une bille noire dure et compacte. Cette réponse est typique d'une fibre synthétique thermoplastique. La différence observée entre les deux matériaux confirme l'importance du tri initial, car les fibres cellulosiques et les fibres polyester ne réagissent pas de la même manière aux traitements acides, à l'hydrolyse ou aux étapes de fonctionnalisation.

Ainsi, le test de combustion a permis de sélectionner les échantillons les plus adaptés à la valorisation chimique envisagée. Dans une démarche d'économie circulaire, cette étape est déterminante : un tri insuffisant peut conduire à des traitements moins efficaces, à une baisse de qualité du matériau obtenu et à une interprétation erronée des performances d'adsorption.

Pour renforcer l'identification, il serait toutefois utile d'associer ce test à des analyses FTIR ou microscopiques, surtout dans le cas de mélanges coton/polyester [1].

Tableau III.1. Résultats du test de combustion des différents échantillons textiles.

Echantillon	Comportement à la flamme	Odeur dégagée	Résidu obtenu	Identification de la fibre
Coton100%	Brûle rapidement et continue à brûler après retrait de la flamme.	Odeur de papier brûlé.	Cendre grise, légère et friable.	Fibre cellulosique (coton).
Polyester	Fond avant de brûler, combustion lente.	Odeur chimique caractéristique.	Bille noire dure et compacte.	Fibre synthétique.

III.2. Détermination du pH au point de charge nulle (pH_{PCZ}) des textiles traités

III.2.1. Traitement par HCl à 80%

Les figures III.1 et III.2 présentent l'évolution de ΔpH en fonction du pH initial pour les textiles traités par HCl, avant et après acétylation. Le pH_{PCZ} correspond au pH pour lequel la charge nette de surface est nulle. En dessous de cette valeur, la surface tend à se charger positivement; au-dessus, elle devient majoritairement négative. Cette information est essentielle pour interpréter l'adsorption du bleu de méthylène, car ce colorant se comporte en solution comme une espèce cationique [2,3].

Les deux courbes montrent un changement de signe de ΔpH dans la zone acide à faiblement acide, ce qui traduit une surface globalement acide après traitement. Cette tendance est attendue pour des matériaux cellulosiques modifiés, dont la surface contient des groupements oxygénés susceptibles de se protoner ou de se déprotoner selon le pH du milieu. Le pH_{PCZ} ne doit donc pas être considéré uniquement comme une valeur numérique, mais comme un indicateur du domaine de pH où les interactions électrostatiques deviennent favorables ou défavorables à l'adsorption [2].

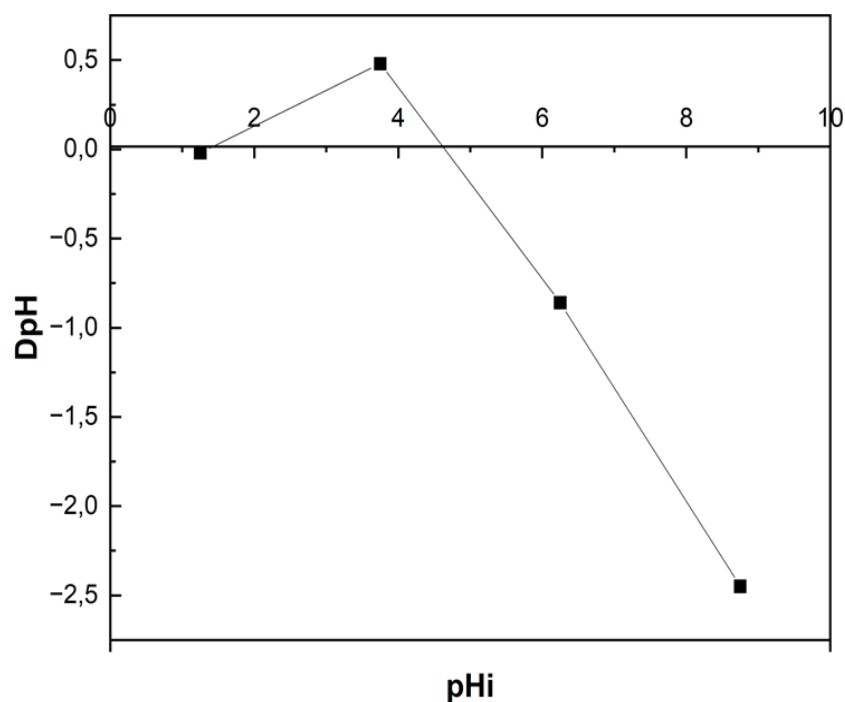


Figure III.1. pH au point de charge zéro (pH_P) du textile traité par HCl sans acétylation.

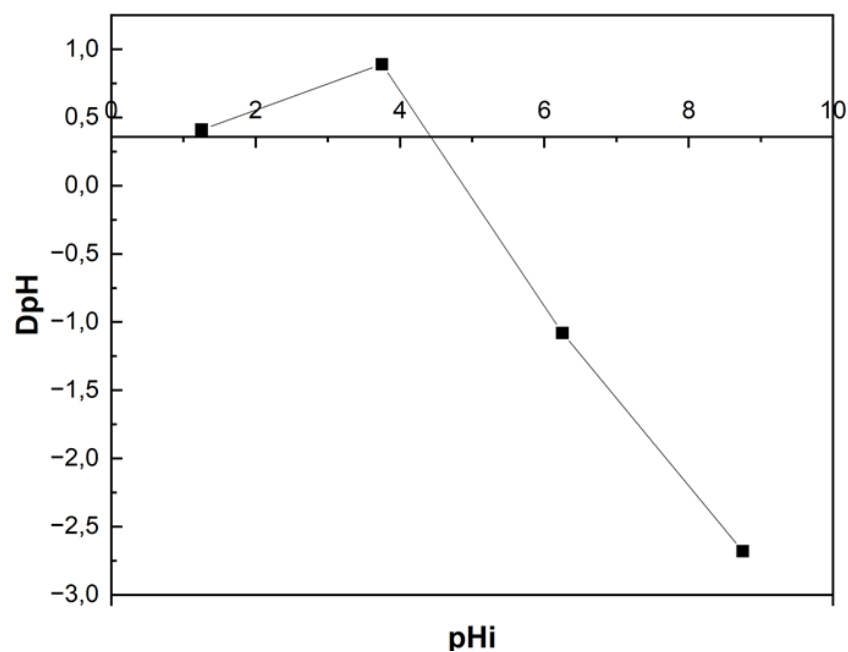


Figure III.2. pH au point de charge zéro (pH_P) du textile traité par HCl avec acétylation.

Pour le matériau traité par HCl sans acétylation, l'intersection de la courbe avec l'axe $\Delta pH = 0$ se situe autour de pH 4,8. Lorsque le pH de la solution est inférieur à cette valeur, la surface est plutôt protonée et donc moins favorable à la fixation d'un colorant cationique. À l'inverse, au-

dessus de pH 4,8, la déprotonation progressive des fonctions de surface confère au matériau une charge négative, ce qui favorise l'attraction électrostatique avec les molécules de BM⁺. Cette interprétation est cohérente avec les travaux portant sur l'adsorption du bleu de méthylène par des adsorbants carbonés ou cellulosiques, où l'augmentation du pH améliore généralement la rétention du colorant [3,4].

Le rôle du pH s'explique aussi par la compétition entre les ions H⁺ et les molécules de BM⁺ pour les sites actifs. En milieu fortement acide, les protons occupent une partie de ces sites et réduisent l'accès du colorant à la surface. En milieu neutre à basique, cette compétition diminue et la surface devient plus négative, ce qui renforce la probabilité de contact et de fixation du colorant. Ainsi, le pH_{PCZ} donne une clé de lecture directe pour comprendre les résultats d'adsorption observés par la suite.

Après acétylation, le pH_{PCZ} est légèrement déplacé vers pH 5,0. Ce faible déplacement montre que l'acétylation modifie la chimie de surface sans transformer complètement le caractère acide du matériau. La conversion d'une partie des groupements hydroxyle en groupements ester peut réduire la polarité et changer l'accessibilité de certains sites. Par conséquent, l'adsorption du BM reste favorisée au-dessus du pH_{PCZ} , mais son intensité dépendra du nombre de fonctions encore disponibles et de la porosité accessible [5,6].

III.2.2. Traitement par H₃PO₄ à 40%

Le traitement des textiles par l'acide phosphorique à 40 % a été réalisé afin de modifier la surface du matériau cellulosique et d'améliorer son aptitude à l'adsorption. Le H₃PO₄ peut favoriser l'introduction de groupements oxygénés et phosphatés, susceptibles d'influencer le comportement acido-basique du coton traité. Dans ce contexte, les Figures III.3 et III.4 présentent l'évolution de ΔpH en fonction du pH initial, respectivement avant et après acétylation. Ces courbes permettent d'estimer le pH au point de charge nulle (pH_{PCZ}), correspondant au pH pour lequel la charge globale de la surface est nulle. La comparaison des deux profils permet ainsi d'apprécier l'effet de l'acétylation sur la surface du textile traité et son comportement potentiel vis-à-vis de l'adsorption du bleu de méthylène.

Les courbes obtenues pour les textiles traités par H₃PO₄ confirment l'existence d'une surface acide, avec un point d'intersection $\Delta pH = 0$ situé entre pH 4 et pH 6. Le traitement à l'acide phosphorique est particulièrement intéressant, car il peut introduire ou révéler des fonctions oxygénées et phosphatées à la surface de la cellulose. Ces fonctions jouent un double rôle : elles

améliorent la réactivité de surface et peuvent créer des sites chargés négativement lorsque le pH devient supérieur au pH_{PCZ} [7].

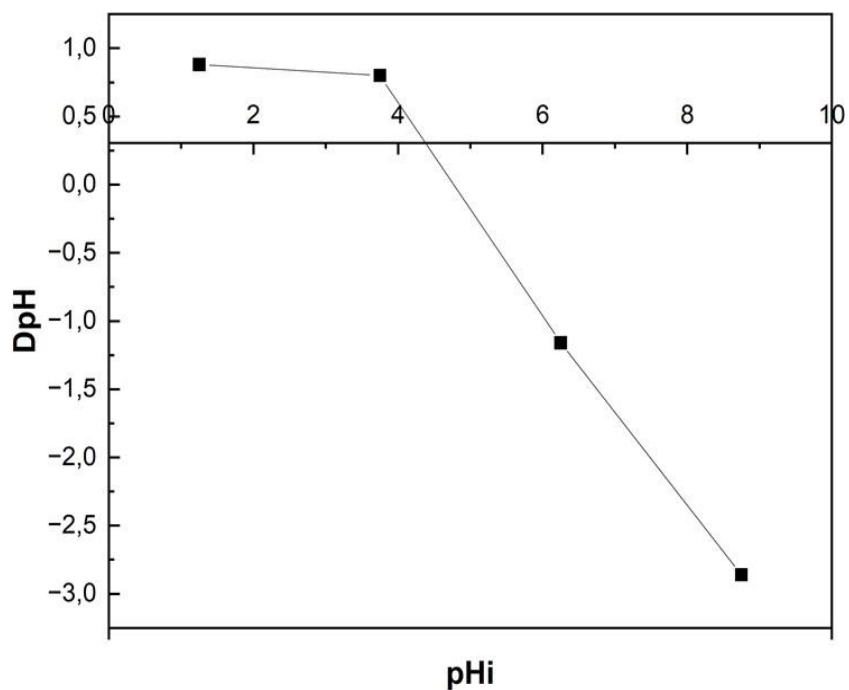


Figure III.3. pH au point de charge zéro (pH_P) du textile traité par H_3PO_4 sans acétylation.

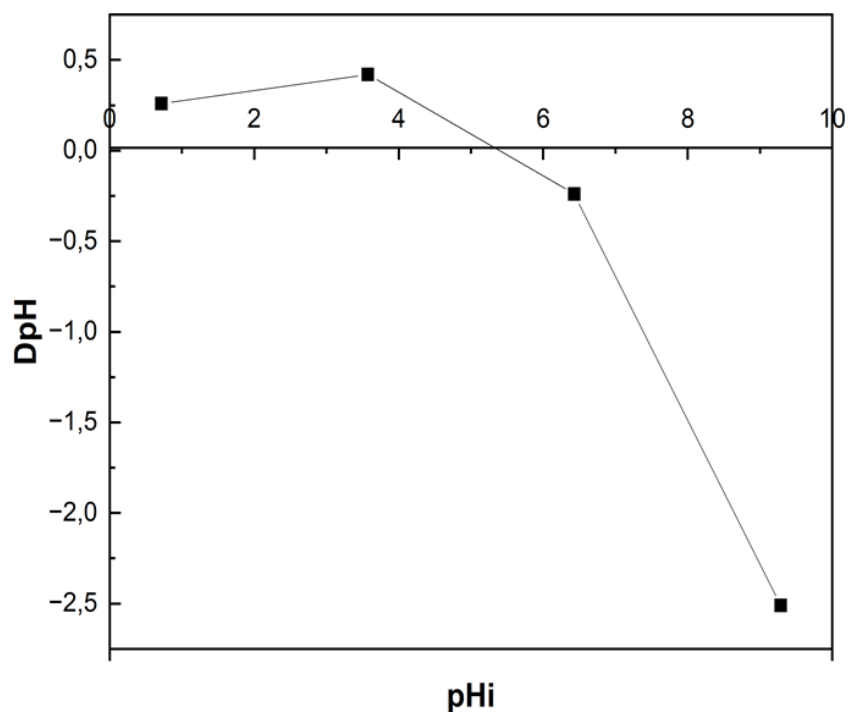


Figure III.4. pH au point de charge zéro (pH_P) du textile traité par H_3PO_4 avec acétylation.

Pour le textile traité par H_3PO_4 sans acétylation, le pH_{PCZ} est estimé à environ 4,8. En dessous de cette valeur, la surface est majoritairement positive, ce qui limite l'adsorption du BM par répulsion électrostatique et compétition avec H^+ . Au-dessus de pH 4,8, les groupements de surface se déprotonent progressivement, rendant la surface plus favorable à la fixation du colorant cationique. Ce comportement confirme que le traitement phosphorique améliore le potentiel d'interaction entre la cellulose modifiée et le BM, notamment lorsque les conditions de pH permettent l'expression des charges négatives [3,7].

Pour le textile traité par H_3PO_4 puis acétylé, le pH_{PCZ} atteint environ 5,3. Cette augmentation modérée suggère une redistribution des fonctions de surface après acétylation. Une partie des hydroxyles disponibles peut être transformée en fonctions ester, ce qui réduit certains sites polaires ; toutefois, la présence de fonctions phosphatées ou oxygénées peut maintenir une capacité d'interaction avec le colorant. L'effet final de l'acétylation ne peut donc pas être résumé à une simple amélioration ou diminution : il dépend du pH, de la concentration en colorant et de l'accessibilité réelle des sites actifs [5,6].

Afin de mieux comparer l'effet des différents traitements chimiques sur la charge de surface des textiles, les valeurs du pH au point de charge nulle (pH_{PCZ}) ainsi que les principales propriétés de surface des matériaux traités par HCl et H_3PO_4 , avant et après acétylation, sont regroupées dans le Tableau III.2.

La comparaison des pH_{PCZ} montre que tous les matériaux présentent une surface acide, avec des valeurs comprises entre 4,8 et 5,3. Le traitement par H_3PO_4 semble légèrement plus favorable à la création de fonctions de surface impliquées dans l'adsorption, en particulier grâce aux groupements phosphatés susceptibles de participer aux interactions électrostatiques ou aux liaisons de type donneur-accepteur. Cependant, cette conclusion doit rester nuancée : le pH_{PCZ} renseigne sur la charge globale, mais il ne suffit pas à lui seul pour prédire la performance finale. La capacité d'adsorption dépend aussi de la surface spécifique, de la porosité, du nombre de sites accessibles et de la nature exacte des fonctions chimiques présentes [7,8].

Afin de mieux comparer l'effet des différents traitements chimiques sur la charge de surface des textiles, les valeurs du pH au point de charge nulle (pH_{PCZ}) ainsi que les principales propriétés de surface des matériaux traités par HCl et H_3PO_4 , avant et après acétylation, sont regroupées dans le Tableau III.2.

L'analyse comparative montre que les quatre matériaux présentent des valeurs de pH_{PCZ} comprises entre 4,8 et 5,3, ce qui traduit un caractère globalement acide de leur surface. Ainsi,

lorsque le pH du milieu est inférieur au pH_P , la surface des textiles traités porte majoritairement des charges positives, tandis qu'elle devient négative lorsque le pH est supérieur à cette valeur. Cette évolution est particulièrement importante pour l'adsorption du bleu de méthylène, qui est un colorant cationique. En effet, à pH supérieur au pH_P , les interactions électrostatiques entre la surface négativement chargée de l'adsorbant et les molécules de BM deviennent plus favorables.

Les textiles traités par HCl présentent des valeurs proches de pH_{PCZ} , soit 4,8 sans acétylation et 5,0 après acétylation. Cette faible variation indique que le traitement par HCl modifie la surface du coton de manière modérée. Son rôle peut être associé principalement au nettoyage de la surface, à l'élimination de certaines impuretés et à l'activation partielle des groupements hydroxyles présents dans la cellulose. L'acétylation entraîne une légère augmentation du pH_{PCZ} , ce qui suggère une modification partielle des fonctions superficielles, sans changement profond du comportement acido-basique du matériau.

En revanche, le traitement par H_3PO_4 semble induire une modification plus marquée de la surface. Le textile traité par H_3PO_4 sans acétylation présente un pH_{PCZ} de 4,8, similaire à celui du textile traité par HCl, mais il se distingue par la présence possible de groupements phosphatés introduits lors du traitement acide. Ces fonctions peuvent augmenter le nombre de sites actifs et renforcer l'affinité du matériau vis-à-vis du bleu de méthylène. Après acétylation, le pH_{PCZ} atteint 5,3, valeur la plus élevée parmi les matériaux étudiés. Ce déplacement traduit une modification de la distribution des fonctions de surface, probablement liée à la coexistence de groupements phosphatés, oxygénés et esterifiés.

Ainsi, les matériaux traités par H_3PO_4 présentent un potentiel d'adsorption plus intéressant que ceux traités par HCl, notamment en raison de la création de sites actifs supplémentaires. Toutefois, cette interprétation doit être nuancée. Le pH_{PCZ} renseigne principalement sur la charge globale de surface, mais il ne permet pas à lui seul de prédire la performance réelle d'adsorption. Celle-ci dépend également de plusieurs paramètres complémentaires, tels que la surface spécifique, la porosité, l'accessibilité des sites actifs, la nature exacte des fonctions chimiques et les conditions opératoires d'adsorption. Par conséquent, les résultats du pH_{PCZ} doivent être discutés en relation avec les essais d'adsorption afin de mieux comprendre le comportement global des textiles traités [7,8].

Tableau III.2. Comparaison du pH_{PCZ} et des propriétés de surface des textiles traités par HCl et H_3PO_4 , avant et après acétylation.

Paramètre	HCl avec acétylation 80%	HCl sans acétylation 80%	H_3PO_4 avec acétylation 40%	H_3PO_4 sans acétylation
pH_{PCZ}	5,0	4,8	5,3	4,8
Charge de surface à $pH < pH_{PCZ}$	Positive	Positive	Positive	Positive
Charge de surface à $pH > pH_{PCZ}$	Négative	Négative	Négative	Négative
Sites actifs créés	Modérés	Modérés	Plus nombreux, grâce aux groupements phosphatés	Plus nombreux
Effet du traitement acide	Modification de la surface après acétylation	Nettoyage de la surface et élimination des impuretés	Modification plus importante de la surface	Introduction de groupements phosphatés
Potentiel d'adsorption	Élevé	Élevé	Plus élevé	Plus élevé

III.3 Adsorption du bleu de méthylène par les textiles traités

III.3. 1 Effet du pH sur l'adsorption du bleu de méthylène par le textile traité au H_3PO_4 , avec et sans acétylation

Les figures III.5 et III.6 mettent en évidence l'influence déterminante du pH sur l'élimination du bleu de méthylène. Pour les deux matériaux, l'adsorption est faible en milieu acide, augmente à pH 6 et devient nettement plus favorable à pH 10. Cette évolution rejoint les résultats du pH_{PCZ} : lorsque le pH de la solution dépasse le pH_{PCZ} , la surface du textile devient plus négative et attire plus efficacement le colorant cationique [2,3].

Pour le coton traité par H_3PO_4 sans acétylation, l'adsorption est rapide et élevée en milieu basique. À pH 10, le rendement atteint environ 85 à 90 % dès les premières dizaines de minutes, puis tend vers un palier. Cette phase rapide correspond probablement à l'occupation des sites

les plus accessibles situés à la surface externe ou dans les pores ouverts. À pH 6, le rendement reste appréciable, mais la cinétique est plus lente, car la déprotonation des fonctions de surface est moins complète. À pH 2, l'efficacité chute fortement, ce qui traduit à la fois la protonation de la surface et la compétition des ions H^+ avec le BM pour les sites actifs [3,4].

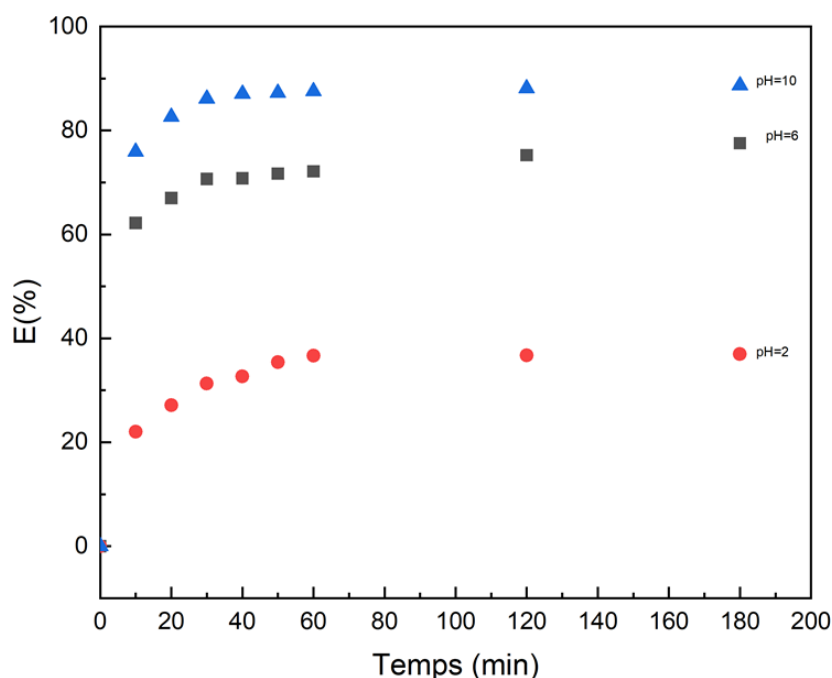


Figure III.5. Effet du pH sur le rendement d'adsorption du bleu de méthylène par le textile traité par H_3PO_4 sans l'acétylation.

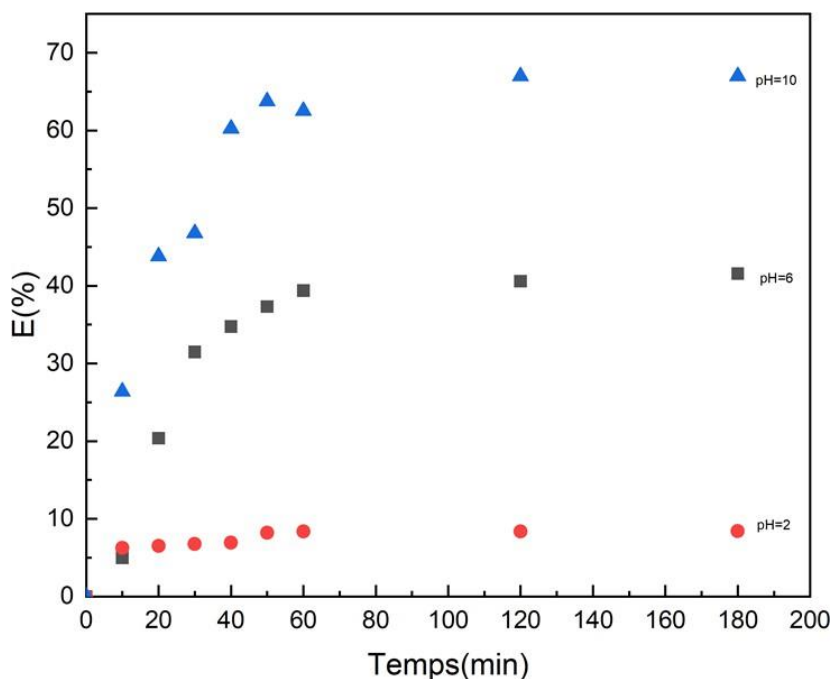


Figure III.6. Effet du pH sur le rendement d'adsorption du bleu de méthylène par le textile traité par H_3PO_4 avec l'acétylation.

Après acétylation, le rendement diminue globalement, surtout à pH 6 et à pH 2. À pH 10, l'adsorption reste possible, mais elle devient moins intense que pour le matériau non acétylé. Cette baisse peut être attribuée à la consommation partielle des groupements -OH de la cellulose lors de l'acétylation, ce qui réduit la densité des sites polaires disponibles. Elle peut également traduire une diminution de l'accessibilité des sites internes si la modification chimique entraîne une réorganisation ou un masquage de la surface [5,6].

Ces résultats montrent que les groupements hydroxyle libres conservent un rôle important dans la fixation du bleu de méthylène. L'acétylation peut améliorer certaines propriétés du matériau, mais dans ce cas elle semble limiter les interactions favorables avec le BM, en particulier lorsque l'adsorption repose fortement sur les interactions électrostatiques et les liaisons faibles avec les fonctions oxygénées. Le matériau traité par H_3PO_4 sans acétylation apparaît donc le plus performant pour l'adsorption en milieu basique, dans les conditions étudiées.

III.3.2. Effet du pH sur l'adsorption du bleu de méthylène par le coton traité au HCl avec acétylation

La Figure III.7 illustre l'effet du pH sur l'efficacité d'élimination $E(\%)$ du bleu de méthylène par le coton traité par HCl puis acétylé. En milieu basique (pH 10), l'adsorption augmente progressivement au cours du temps pour atteindre environ 92 % après 90 min, sans apparition nette d'un plateau, ce qui indique que cette condition est la plus favorable. À pH 6, la cinétique est plus lente, avec une progression régulière du rendement jusqu'à environ 52 % après 90 min, suivie d'une légère tendance à la stabilisation. En revanche, à pH 2, l'adsorption reste très faible durant les premières minutes, puis n'augmente que légèrement pour atteindre environ 8 à 22 %, traduisant une forte inhibition du processus en milieu fortement acide.

Cette évolution peut s'expliquer par l'effet du pH sur la charge de surface du matériau. L'acétylation modifie une partie des groupements hydroxyle de la cellulose en groupements ester, tout en laissant subsister des groupements -OH résiduels. À pH 10, ces groupements peuvent se déprotoner, conférant à la surface une charge négative favorable à l'attraction électrostatique des molécules cationiques du bleu de méthylène. De plus, une hydrolyse partielle de certains groupements ester peut générer des fonctions carboxylates COO^- , renforçant l'adsorption. À pH 6, la déprotonation reste partielle, ce qui explique l'efficacité intermédiaire observée. En milieu acide, à pH 2, la forte concentration en ions H^+ entraîne une

compétition avec le colorant pour les sites actifs et favorise la protonation de la surface, limitant ainsi les interactions avec le bleu de méthylène [2,3].

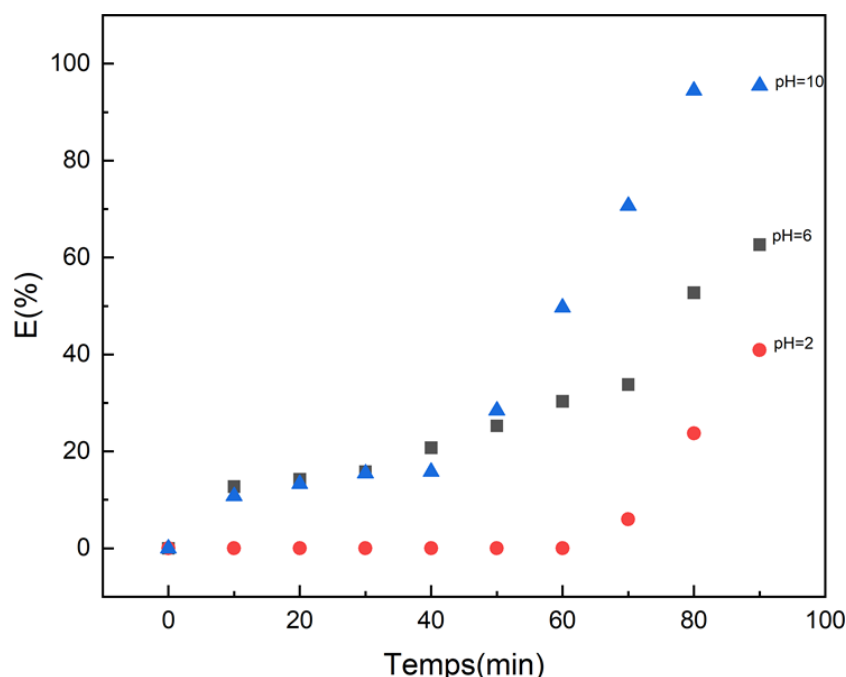


Figure III.7. Effet du pH sur le rendement d'adsorption du bleu de méthylène par le textile traité par HCl avec l'acétylation.

III.3.3. Effet de la concentration initiale sur l'adsorption du bleu de méthylène par le coton traité au H_3PO_4 , avec et sans acétylation

Les figures III.8 et III.9 illustrent l'effet de la concentration initiale en bleu de méthylène, étudiée à 20 et 40 $mg.L^{-1}$, sur le rendement d'élimination. L'interprétation de ce paramètre doit être faite avec prudence, car le rendement $E(\%)$ ne renseigne pas directement sur la quantité adsorbée par gramme de matériau. Il est donc recommandé d'associer systématiquement $E(\%)$ à la capacité d'adsorption q_e afin de distinguer une amélioration réelle de la performance d'un simple effet de dilution ou de saturation [8].

Pour le coton traité par H_3PO_4 sans acétylation, le rendement à 20 $mg.L^{-1}$ atteint rapidement un palier autour de 52 %. À 40 $mg.L^{-1}$, le rendement augmente progressivement jusqu'à environ 65 %. Cette différence peut s'expliquer par un gradient de concentration plus élevé, qui intensifie le transfert de masse du colorant vers la surface de l'adsorbant. Dans ces conditions, la concentration de 20 $mg.L^{-1}$ ne semble pas exploiter complètement les sites disponibles, alors que 40 $mg.L^{-1}$ fournit une force motrice plus importante pour le transport du BM vers les sites actifs [4,9].

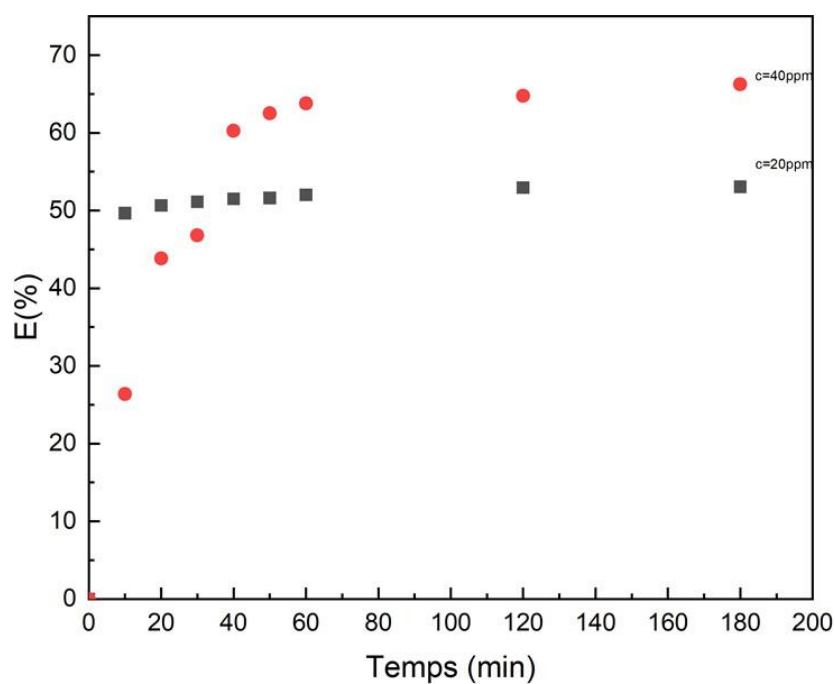


Figure III.8. Effet de la concentration initiale du bleu de méthylène sur le rendement d'adsorption par le textile traité par H_3PO_4 sans acétylation.

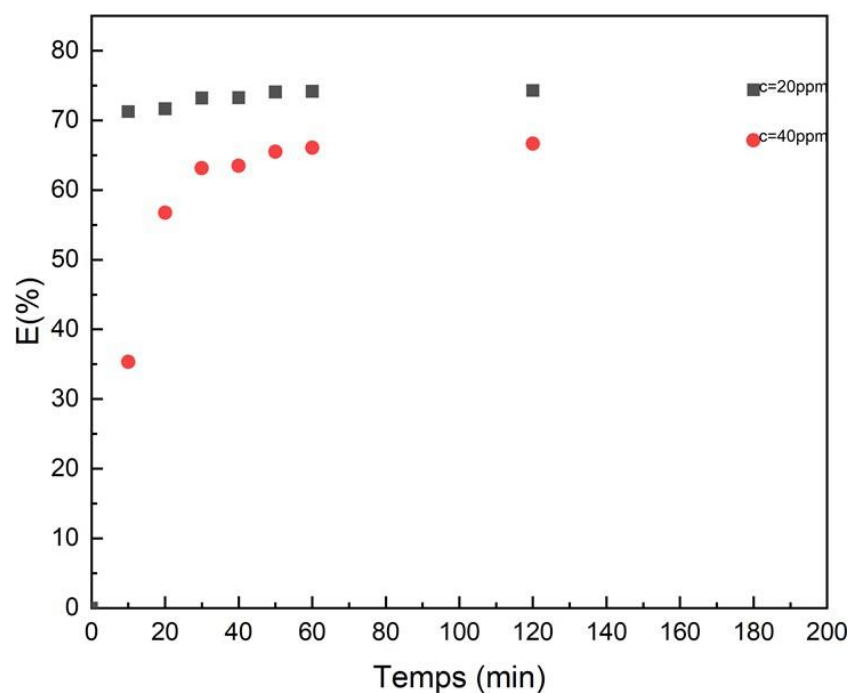


Figure III.9. Effet de la concentration du Bleu de méthylène sur le rendement d'adsorption de BM par le textile traité par H_3PO_4 avec l'acétylation.

Après acétylation, le matériau présente un rendement élevé à 20 mg.L^{-1} , proche de 72 %, mais se stabilise autour de 65 % à 40 mg.L^{-1} . Cette évolution suggère qu'à faible concentration, les

sites disponibles restent suffisants pour retenir une grande partie du colorant. En revanche, lorsque la concentration augmente, la saturation devient plus rapide et les sites accessibles deviennent limitants. La modification des groupements hydroxyle en groupements ester peut ainsi réduire la flexibilité de la surface et limiter l'adsorption à forte charge en colorant [5,6].

III.3.4 Effet de la masse d'adsorbant sur l'adsorption du bleu de méthylène par le coton traité au H_3PO_4 , avec et sans acétylation

Les figures III.10 et III.11 montrent que l'augmentation de la masse d'adsorbant améliore nettement le rendement d'élimination du bleu de méthylène. Ce résultat est attendu, car une masse plus élevée apporte davantage de surface de contact et un plus grand nombre de sites actifs disponibles. Cependant, comme pour l'effet de la concentration, l'interprétation doit être complétée par la capacité q_e : un rendement plus élevé ne signifie pas toujours une meilleure utilisation de chaque gramme d'adsorbant [4,8].

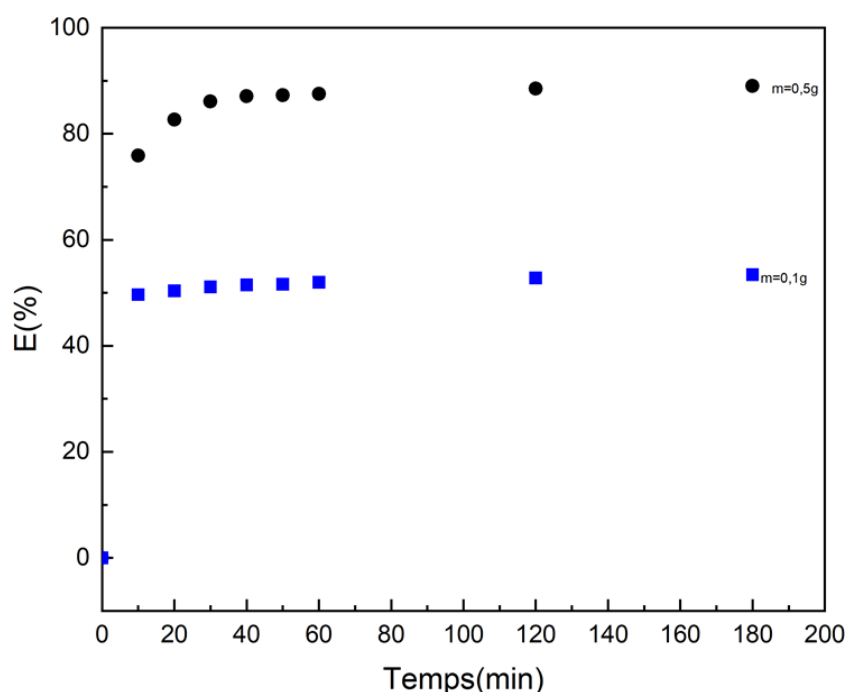


Figure III.10 Effet de masse de la suspension sur le rendement d'adsorption de BM par le textile traité par H_3PO_4 sans l'acétylation

Pour le coton traité par H_3PO_4 sans acétylation, la masse de 0,5 g permet d'atteindre environ 85 à 90 % d'élimination, alors que 0,1 g conduit à un rendement proche de 50 %. La différence indique que, dans les conditions testées, la quantité de sites disponibles à 0,1 g devient

rapidement limitante. L'équilibre est atteint rapidement, ce qui suggère une adsorption dominée au départ par les sites les plus accessibles. La masse de 0,5 g réduit la probabilité de saturation et favorise donc une élimination plus complète du colorant.

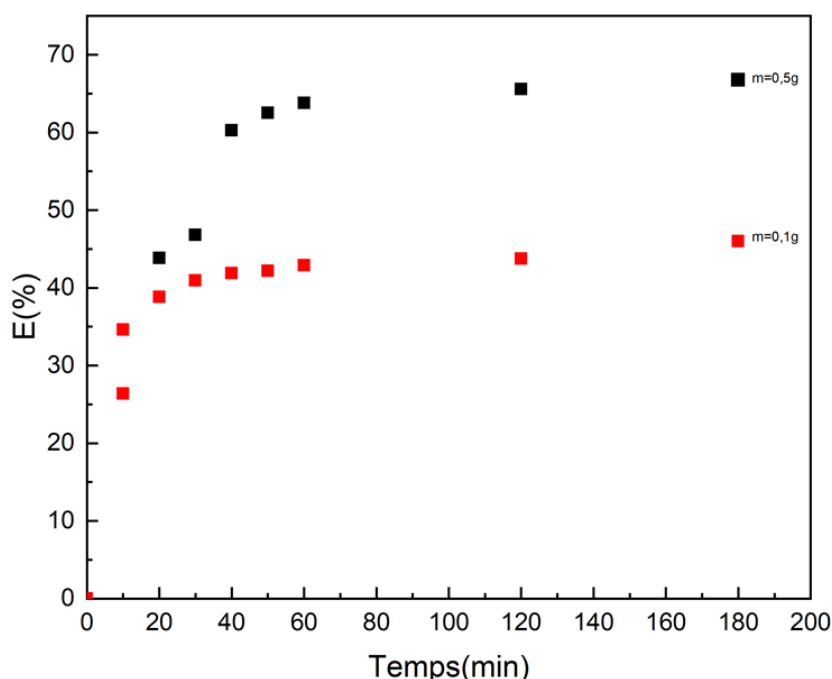


Figure III.11 Effet de masse de la suspension sur le rendement d'adsorption de BM par le textile traité par H_3PO_4 avec l'acétylation

Après acétylation, les rendements diminuent pour les deux masses, ce qui confirme que la chimie de surface joue un rôle aussi important que la quantité d'adsorbant. La masse de 0,5 g reste la plus performante, mais l'écart avec 0,1 g est moins marqué que pour le matériau non acétylé. Ce résultat suggère que, lorsque les sites actifs sont partiellement masqués ou moins polaires, ajouter davantage de matériau améliore le rendement, mais ne compense pas totalement la baisse de réactivité de surface [5,6].

III.4. Étude comparative et positionnement des résultats

Afin d'enrichir la discussion, les résultats obtenus dans ce chapitre peuvent être replacés dans une étude comparative avec des travaux portant sur l'adsorption du bleu de méthylène par des matériaux cellulosiques, des déchets textiles ou des adsorbants activés chimiquement. Cette comparaison ne vise pas à classer directement les matériaux, car les conditions opératoires diffèrent d'une étude à l'autre. Elle permet plutôt de situer le comportement des textiles traités

dans un cadre plus large et d'identifier les paramètres qui gouvernent réellement l'efficacité d'adsorption : nature de la surface, pH du milieu, porosité, dose d'adsorbant, concentration initiale et accessibilité des sites actifs.

Dans la présente étude, les meilleurs rendements sont observés pour le coton traité par H_3PO_4 sans acétylation, notamment en milieu basique et pour une masse d'adsorbant plus élevée. Ce comportement rejoint les tendances généralement rapportées pour les adsorbants destinés à l'élimination du BM : une surface plus négative au-dessus du pH_{PCZ} favorise l'attraction du colorant cationique, tandis qu'une concentration suffisante en fonctions oxygénées ou phosphatées peut renforcer les interactions de surface. Cependant, l'efficacité ne dépend pas uniquement de la charge globale. Les performances les plus élevées décrites dans la littérature sont souvent associées à des matériaux fortement poreux, activés ou carbonisés, présentant une surface spécifique importante et une meilleure diffusion du colorant vers les sites internes [10-14].

Tableau III.3. Positionnement comparatif des textiles traités vis-à-vis de quelques adsorbants rapportés pour l'élimination du bleu de méthylène.

Matériau / approche	Résultat ou observation principale	Apport pour l'interprétation	Réf.
Coton traité par H_3PO_4 sans acétylation (présente étude)	Rendement élevé en milieu basique ; amélioration avec l'augmentation de la masse d'adsorbant.	Le traitement phosphorique conserve ou crée des fonctions favorables à la fixation du BM, mais la performance doit être complétée par le calcul de q_e .	Ce travail
Déchets de coton utilisés comme adsorbant du BM	L'adsorption dépend du pH ; les modèles de Langmuir et de pseudo-second ordre décrivent correctement le processus.	Confirme l'intérêt des résidus celluloseux comme adsorbants et la nécessité d'associer rendement, isotherme et cinétique.	[10]

Films biocomposites charbon actif / cellulose	Capacité maximale rapportée : environ 103,66 mg.g ⁻¹ ; ajustement par Langmuir et pseudo-second ordre.	Montre que l'association cellulose-charbon actif améliore l'accessibilité des sites et la capacité d'adsorption.	[11]
Charbon actif issu de Rumex abyssinicus	pH_{PCZ} proche de 5,03 ; rendement maximal de 99,9 % et capacité d'environ 322 mg.g ⁻¹ dans les conditions optimisées.	Les valeurs de pH_{PCZ} proches de celles de ce travail confirment le caractère acide des surfaces, mais la forte porosité explique les performances supérieures.	[12]
Microsphères hydrothermales activées par H ₃ PO ₄	Capacité maximale rapportée : 409,84 mg.g ⁻¹ pour certains précurseurs de biomasse.	Souligne le rôle de H ₃ PO ₄ dans le développement de la porosité et des fonctions de surface, surtout lorsqu'il est associé à une activation thermique.	[13]
Composite argile / cellulose optimisé par plan d'expériences	Rendement maximal de 98,76 % et capacité de 254,8 mg.g ⁻¹ à pH 7.	Montre l'intérêt d'une optimisation simultanée des paramètres opératoires plutôt qu'une variation séparée de chaque facteur.	[14]

Cette comparaison met en évidence un point important : les rendements obtenus dans ce travail sont encourageants pour un matériau textile simplement traité, mais ils restent difficiles à comparer directement aux adsorbants activés thermiquement ou aux composites fortement poreux. Les matériaux carbonisés ou activés au H₃PO₄ atteignent généralement des capacités plus élevées, car l'activation développe une porosité plus importante et augmente la surface accessible au colorant. À l'inverse, le coton traité chimiquement sans carbonisation présente l'avantage d'une préparation plus simple, moins énergivore et plus proche d'une logique de valorisation douce des déchets textiles.

L'effet de l'acétylation doit également être interprété avec prudence. Bien que cette modification puisse améliorer certaines propriétés de stabilité ou d'hydrophobicité, elle peut aussi consommer une partie des groupements hydroxyle de la cellulose et réduire la disponibilité des sites polaires. La diminution des rendements observée après acétylation, notamment pour le coton traité par H_3PO_4 , suggère donc que les fonctions -OH libres et les groupements oxygénés accessibles participent activement à la rétention du BM. Cette observation est cohérente avec les études sur les matériaux cellulosiques, où les interactions électrostatiques, les liaisons hydrogène et l'accessibilité des sites jouent un rôle complémentaire dans le processus d'adsorption [11,14].

Sur le plan méthodologique, cette étude comparative montre qu'il serait pertinent de compléter les rendements d'élimination $E(\%)$ par la capacité d'adsorption q_e ($mg.g^{-1}$), puis par un ajustement cinétique et isotherme. Le rendement indique la fraction de colorant éliminée de la solution, mais il ne renseigne pas suffisamment sur l'utilisation réelle de chaque gramme d'adsorbant. Le calcul de q_e permettrait donc de comparer plus rigoureusement les matériaux entre eux, surtout lorsque la masse d'adsorbant ou la concentration initiale varie. L'application des modèles de Langmuir, Freundlich et pseudo-second ordre permettrait ensuite de préciser si l'adsorption est plutôt dominée par une surface homogène, une surface hétérogène ou par des interactions spécifiques entre le BM et les fonctions de surface [10-12].

III.5. Conclusion

L'ensemble des résultats montre que les déchets textiles cellulosiques peuvent être valorisés comme adsorbants après traitement chimique, à condition que la nature des fibres et la chimie de surface soient bien maîtrisées. Le test de combustion a confirmé la différence de comportement entre le coton et le polyester, justifiant l'importance du tri avant traitement. Les valeurs de pH_P , comprises entre 4,8 et 5,3, révèlent des surfaces à caractère acide, qui deviennent favorables à l'adsorption du bleu de méthylène lorsque le pH de la solution dépasse le pH_{PCZ} .

Les essais d'adsorption montrent que le pH est le facteur le plus déterminant : les meilleurs rendements sont obtenus en milieu basique, où la surface négative interagit plus efficacement avec le colorant cationique. Le traitement par H_3PO_4 sans acétylation apparaît particulièrement intéressant, car il permet de conserver des fonctions de surface favorables à la fixation du BM. L'acétylation modifie les performances de manière contrastée : elle peut améliorer certains

rendements à faible concentration, mais tend globalement à réduire l'accessibilité ou la polarité des sites actifs.

L'analyse des résultats montre que le recyclage chimique constitue une voie efficace pour valoriser les déchets textiles et leur donner une nouvelle application comme adsorbants. Les traitements réalisés ont mis en évidence l'influence de l'agent chimique utilisé, notamment HCl et H₃PO₄, ainsi que de l'acétylation sur les propriétés de surface et les performances d'adsorption du bleu de méthylène.

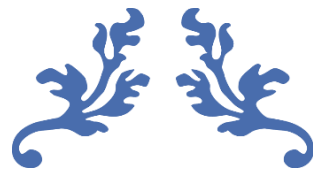
Cette approche s'inscrit dans une démarche d'économie circulaire, en contribuant à la réduction des déchets textiles et au traitement des eaux polluées par les colorants. Comme perspectives, il serait intéressant d'optimiser les conditions de traitement chimique et d'étudier la réutilisation des adsorbants après plusieurs cycles d'adsorption-désorption.

III.6. Références bibliographiques

- [1] Baloyi, R. B., Gbadeyan, O. J., Sithole, B., & Chunilall, V. (2023). Recent advances in recycling technologies for waste textile fabrics: a review. *Textile Research Journal*, 94(3–4), 508–529. <https://doi.org/10.1177/00405175231210239>.
- [2] Noh, J. S., & Schwarz, J. A. (1989). Estimation of the point of zero charge of simple oxides by mass titration. *Journal of Colloid and Interface Science*, 130(1), 157–164. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(89\)90086-6](https://doi.org/10.1016/0021-9797(89)90086-6).
- [3] Pathania, D., Sharma, S., & Singh, P. (2013). Removal of methylene blue by adsorption onto activated carbon developed from *Ficus carica* bast. *Arabian Journal of Chemistry*, 10, S1445–S1451. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.04.021>.
- [4] Annadurai, G., Juang, R., & Lee, D. (2002). Use of cellulose-based wastes for adsorption of dyes from aqueous solutions. *Journal of Hazardous Materials*, 92(3), 263–274. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(02\)00017-1](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(02)00017-1).
- [5] Silva, L. D. S., De Oliveira Carvalho, J., De Sousa Bezerra, R. D., Da Silva, M., Ferreira, F., Osajima, J., & Da Silva Filho, E. (2018). Potential of Cellulose Functionalized with Carboxylic Acid as Biosorbent for the Removal of Cationic Dyes in Aqueous Solution. *Molecules*, 23(4), 743. <https://doi.org/10.3390/molecules23040743>.
- [6] Bouhdadi, R., Benhadi, S., Molina, S., George, B., Moussaouiti, M. E., & Merlin, A. (2013). Chemical modification of cellulose by acylation: Application to adsorption of methylene

- blue. *Maderas Ciencia Y Tecnología*, 13(1), 105–116. <https://doi.org/10.4067/s0718-221x2011000100009>.
- [7] Said, H. A., Bourhim, I. A., Ouarga, A., Iraola-Arregui, I., Lahcini, M., Barroug, A., Noukrati, H., & Youcef, H. B. (2022). Sustainable phosphorylated microcrystalline cellulose toward enhanced removal performance of methylene blue. *International Journal of Biological Macromolecules*, 225, 1107–1118. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.11.172>.
- [8] Foo, K., & Hameed, B. (2009). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal*, 156(1), 2–10. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.013>.
- [9] Zein, R., Purnomo, J. S., Ramadhani, P., Safni, Alif, M. F., & Putri, C. N. (2022). Enhancing sorption capacity of methylene blue dye using solid waste of lemongrass biosorbent by modification method. *Arabian Journal of Chemistry*, 16(2), 104480. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.104480>.
- [10] Tenev, M. D., Farías, A., Torre, C., Fontana, G., Caracciolo, N., & Boeykens, S. (2019). Cotton industry waste as adsorbent for methylene blue. *Journal of Sustainable Development of Energy Water and Environment Systems*, 7(4), 667–677. <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d7.0269>.
- [11] Somsesta, N., Sricharoenchaikul, V., & Aht-Ong, D. (2019). Adsorption removal of methylene blue onto activated carbon/cellulose biocomposite films: Equilibrium and kinetic studies. *Materials Chemistry and Physics*, 240, 122221. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122221>.
- [12] Fito, J., Abewaa, M., Mengistu, A., Angassa, K., Ambaye, A. D., Moyo, W., & Nkambule, T. (2023). Adsorption of methylene blue from textile industrial wastewater using activated carbon developed from *Rumex abyssinicus* plant. *Scientific Reports*, 13(1), 5427. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-32341-w>.
- [13] Alhawtali, S., El-Harbawi, M., Al-Awadi, A. S., Blidi, L. E., Alrashed, M. M., & Yin, C. (2023). Enhanced Adsorption of Methylene Blue Using Phosphoric Acid-Activated Hydrothermal Carbon Microspheres Synthesized from a Variety of Palm-Based Biowastes. *Coatings*, 13(7), 1287. <https://doi.org/10.3390/coatings13071287>.
- [14] Hamidi, A., Atia, D., Rebiai, A., Reghioua, A., Zobeidi, A., Messaoudi, M., Seghir, B. B., Pohl, P., & Simal-Gandara, J. (2023). Investigation of adsorption kinetics and isothermal

thermodynamics for optimizing methylene blue adsorption onto a modified clay with cellulose using the response surface approach. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(18), 22573–22587. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04397-1>.



CONCLUSION GENERALE



Ce travail porte sur la valorisation des déchets textiles à base de coton pour les transformer en matériaux adsorbants capables d'éliminer les colorants présents dans l'eau. Cette démarche permet de répondre à deux problèmes importants : la production de déchets textiles et la pollution des eaux par les colorants. Ainsi, le déchet textile n'est plus considéré comme une matière inutile, mais comme une ressource pouvant être réutilisée dans une application environnementale.

La première étape de l'étude a consisté à identifier la nature des déchets textiles. Le test de combustion a permis de différencier les fibres naturelles, comme le coton, des fibres synthétiques, comme le polyester. Cette étape est importante, car le choix du traitement chimique dépend directement de la nature de la fibre. Le coton a été retenu comme matière première principale en raison de sa richesse en cellulose et en groupements hydroxyle, qui peuvent favoriser les interactions avec les colorants.

Les déchets de coton ont ensuite été traités chimiquement par HCl et H₃PO₄, avec ou sans acétylation, afin de modifier leurs propriétés de surface. La détermination du pH au point de charge nulle (pH_{PCZ}) a montré que les matériaux préparés présentent un caractère acide, avec des valeurs comprises entre 4,8 et 5,3. Lorsque le pH de la solution est supérieur au pH_{PCZ} , la surface de l'adsorbant devient négative, ce qui favorise l'attraction avec le bleu de méthylène, qui est un colorant cationique.

Les essais d'adsorption ont montré que le pH joue un rôle important dans l'élimination du bleu de méthylène. Les meilleurs résultats ont été obtenus en milieu basique, où les interactions entre l'adsorbant et le colorant sont plus favorables. L'augmentation de la masse d'adsorbant améliore aussi le rendement, car elle offre un plus grand nombre de sites actifs. En revanche, lorsque la concentration initiale du colorant augmente, les sites actifs peuvent être rapidement occupés, ce qui peut conduire à une saturation de la surface.

Parmi les matériaux étudiés, le coton traité par H₃PO₄ sans acétylation a montré des résultats intéressants. Cette performance peut être liée à la présence de groupements oxygénés et phosphatés, qui améliorent l'affinité du matériau pour le bleu de méthylène. L'acétylation a eu un effet moins marqué, car elle peut réduire la disponibilité des groupements hydroxyle libres, importants dans le processus d'adsorption.

De manière générale, les résultats obtenus montrent que les déchets textiles cellulosiques peuvent être utilisés comme adsorbants pour le traitement des eaux colorées. Cette approche

présente un double avantage : elle permet de réduire les déchets textiles et de proposer une solution simple pour l'élimination des colorants en solution aqueuse. Elle s'inscrit donc dans une logique d'économie circulaire, où le déchet devient une matière utile.

Ce travail peut être approfondi par l'optimisation des conditions de traitement chimique, notamment la concentration de l'acide, le temps de contact, la température et les conditions d'acétylation. Il serait aussi utile de calculer la capacité d'adsorption q_e , exprimée en mg/g, afin de mieux comparer les performances des différents matériaux préparés.

L'étude des modèles cinétiques et des isothermes d'adsorption permettrait également de mieux comprendre le mécanisme de fixation du bleu de méthylène. Les modèles de pseudo-premier ordre, pseudo-second ordre, Langmuir et Freundlich pourraient être utilisés dans ce but. Des analyses complémentaires, comme la FTIR, la MEB, la DRX, l'ATG et la mesure de la surface spécifique, aideraient aussi à mieux relier la structure des matériaux à leur efficacité d'adsorption.

Enfin, il serait intéressant d'étudier la régénération et la réutilisation des adsorbants après plusieurs cycles d'adsorption-désorption. Cela permettrait d'évaluer leur stabilité et leur intérêt économique. Des essais sur d'autres colorants, sur des mélanges de polluants ou sur de vrais effluents textiles pourraient aussi être réalisés. À long terme, cette approche pourrait être appliquée dans une entreprise textile comme ALCOVEL/TEXALG afin de mieux valoriser les déchets de production.

Ainsi, ce mémoire montre que les déchets de coton peuvent être transformés en matériaux utiles pour le traitement des eaux. Cette valorisation permet de relier deux objectifs importants : réduire les déchets textiles et lutter contre la pollution des eaux par les colorants. Les résultats obtenus ouvrent donc des perspectives intéressantes pour le développement d'adsorbants simples, économiques et issus de ressources recyclées.

Résumé

Ce travail porte sur la valorisation chimique de déchets textiles cellulosiques issus du coton, en vue de les transformer en adsorbants pour l'élimination du bleu de méthylène en solution aqueuse. Après collecte, tri et identification des fibres, les échantillons ont été soumis à des traitements par HCl et H₃PO₄, avec ou sans acétylation. Les valeurs du pH_{PCZ} , comprises entre 4,8 et 5,3, indiquent des surfaces globalement acides. Les essais d'adsorption montrent que le pH, la concentration initiale et la masse d'adsorbant influencent fortement le rendement. Les meilleures performances sont observées en milieu basique, notamment pour le coton traité par H₃PO₄ sans acétylation.

Mots clés : déchets textiles, coton, recyclage chimique, adsorption, bleu de méthylène.

Abstract

This study focuses on the chemical valorization of cotton-based textile waste for its conversion into adsorbent materials used to remove methylene blue from aqueous solutions. After collection, sorting and fiber identification, the selected samples were chemically treated with HCl and H₃PO₄, with or without acetylation. The point of zero charge values, ranging from 4.8 to 5.3, revealed an overall acidic surface character. Adsorption experiments showed that solution pH, initial dye concentration and adsorbent mass strongly affected the removal efficiency. The best performances were obtained under basic conditions, especially for the cotton treated with H₃PO₄ without acetylation. This approach links textile waste reduction with wastewater treatment in a circular economy perspective.

Keywords: textile waste, cotton, chemical recycling, adsorption, methylene blue.

ملخص

يركز هذا العمل على تـمـيـن النـفـاـيـات النـسـيـجـيـة السـلـيـلـوـزـيـة ذات الأصل القطنـي، وذلك بتحويلها كيميائياً إلى مواد مازة قابلة للاستعمال في إزالة أزرق الميثيلين من المحاليل المائية. بعد الجمع والفرز والتعرف على طبيعة الألياف، عولجت العينات باستعمال حمض الهيدروكلوريك وحمض الفوسفوريك، مع تطبيق الأسيتلة أو بدونها. أظهرت قيم pH_{PCZ} المحصورة بين 4.8 و5.3، أن سطح المواد المحضرة ذو طابع حمضي عام. كما بينت اختبارات الامتزاز أن قيمة pH، والتركيز الابتدائي للملون، وكتلة المادة المازة تؤثر بوضوح في مردود الإزالة. وقد سُجِلت أفضل النتائج في الوسط القاعدي، خاصة عند استعمال القطن المعالج بـ H₃PO₄ دون أسيتلة، مما يبرز إمكانية الجمع بين تـمـيـن النـفـاـيـات النـسـيـجـيـة ومعالجة المياه الملوثة.

الكلمات المفتاحية: النفايات النسيجية، القطن، التدوير الكيميائي، الامتزاز، أزرق الميثيلين