

# Xylanase alcaline industrielle pour pâte et papier : pré-blanchiment, bleach boosting et optimisation des fibres

Équipe de recherche Enzymes.bio · Wellington, Nouvelle-Zélande · June 19, 2026

La xylanase alcaline industrielle est un auxiliaire enzymatique utilisé en papeterie pour hydrolyser une partie du xylane des hémicelluloses, rendre la matrice fibreuse plus accessible et améliorer l'efficacité des étapes de blanchiment. Dans les pâtes kraft, recyclées ou à haut rendement, elle agit surtout comme traitement de pré-blanchiment ou de "bleach boosting", plutôt que comme substitut complet aux séquences chimiques existantes <sup>[1][2][3]</sup>. Enzymes.bio fournit ce produit en ligne par unité de 1 kg ; le certificat d'analyse et la fiche de données de sécurité sont fournis avec la commande .

## Rôle d'une xylanase alcaline dans les procédés papetiers

Une xylanase est une enzyme qui catalyse l'hydrolyse du xylane, un polysaccharide hémicellulosique abondant dans les parois végétales. Dans le contexte de la pâte et du papier, l'objectif n'est pas de dégrader la cellulose qui porte la résistance mécanique de la feuille, mais de modifier de manière ciblée la fraction hémicellulosique qui peut limiter la pénétration des produits de blanchiment ou retenir des composés associés à la lignine <sup>[2][3]</sup>.

Le qualificatif **alcaline** indique que l'enzyme est destinée à fonctionner dans des environnements de pH compatibles avec des procédés papetiers souvent neutres à alcalins. Cette propriété est importante, car les étapes en aval du procédé kraft, du lavage, du pré-blanchiment ou de certains traitements de pâtes recyclées ne se déroulent pas toujours dans des conditions acides ; les hémicellulases alcalines sont donc étudiées précisément pour ces environnements industriels <sup>[2][4][5]</sup>.

Dans une ligne papetière, la xylanase alcaline est généralement positionnée comme **auxiliaire de procédé**. Elle prépare la pâte à mieux répondre aux agents oxydants ou alcalins appliqués ensuite, en réduisant l'effet barrière du xylane de surface et en facilitant la libération ou l'exposition de fractions liées à la lignine <sup>[1][3]</sup>. Cette approche est documentée dans les travaux sur le bioblanchiment, notamment pour les pâtes kraft et les pâtes issues de papier récupéré <sup>[1][6]</sup>.

Enzymes.bio doit être compris ici comme un fournisseur en ligne du produit, non comme un fabricant ni comme un laboratoire d'essai. La présentation commerciale du produit indique une vente directe par unité de 1 kg, avec certificat d'analyse et fiche de données de sécurité fournis avec la commande .

## **Pourquoi le xylane influence la blanchissabilité de la pâte**

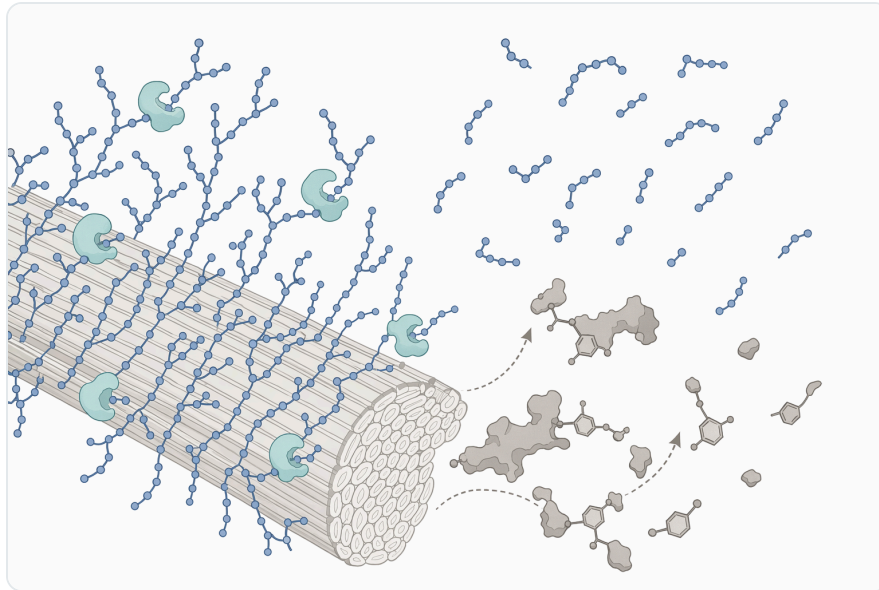
---

Le xylane est une hémicellulose structurale qui accompagne la cellulose et la lignine dans les matières lignocellulosiques. Après cuisson kraft ou autres traitements alcalins, une partie du xylane peut rester dans la paroi ou se redistribuer à la surface des fibres ; cette fraction influence les propriétés de surface, les interactions colloïdales et la rétention dans la fabrication du papier <sup>[3]</sup>.

Ce point est central pour le blanchiment. La lignine résiduelle est l'un des principaux contributeurs à la couleur de la pâte, mais elle n'est pas toujours directement accessible aux agents de blanchiment. Lorsque le xylane forme une couche ou un réseau à proximité de la lignine résiduelle, il peut limiter la diffusion des réactifs et augmenter la demande chimique nécessaire pour atteindre un niveau de blancheur donné <sup>[3]</sup>.

La xylanase modifie cette situation sans agir comme une enzyme ligninolytique au sens strict. Elle coupe des liaisons dans le xylane, ce qui fragilise la barrière hémicellulosique et augmente l'accessibilité de la fibre. Le résultat recherché est une meilleure efficacité des étapes suivantes : dioxyde de chlore, peroxyde d'hydrogène, extraction alcaline ou autres séquences de blanchiment selon le procédé utilisé <sup>[1][2]</sup>.

Cette distinction est importante pour fixer des attentes réalistes. La xylanase alcaline ne "blanchit" pas seule une pâte jusqu'au niveau final attendu pour tous les grades de papier ; elle améliore surtout la réponse de la pâte au traitement de blanchiment. C'est pourquoi la littérature parle fréquemment de prétraitement enzymatique, de bioblanchiment ou de renforcement du blanchiment <sup>[1][7][6]</sup>.



**Figure 1.** 알칼리성 자일라나아제는 표면에 결합된 자일란을 가수분해하여, 이후 표백이나 세정 화학 공정이 섬유에 결합된 리그닌과 오염물에 더 효과적으로 접근할 수 있도록 한다.

## Mécanisme d'action : de l'hydrolyse du xylane à l'amélioration du blanchiment

Le mécanisme commence par la reconnaissance du substrat : la xylanase cible les chaînes de xylane, généralement constituées d'un squelette de xylose relié par des liaisons  $\beta$ -1,4. Les travaux sur les  $\beta$ -1,4-xylanases robustes et exprimées dans des hôtes industriels confirment l'intérêt de cette famille d'enzymes pour des applications où la stabilité et la sélectivité sont déterminantes [8].

Lorsque l'enzyme hydrolyse partiellement le xylane, elle peut réduire la masse moléculaire de certaines fractions hémicellulosiques et détacher des fragments qui obstruaient l'accès aux pores ou à la surface des fibres. Dans les pâtes de bouleau kraft, l'étude de l'élimination du xylane montre que cette fraction influence non seulement les fibres, mais aussi les interactions colloïdales et la rétention, ce qui explique pourquoi une modification enzymatique ciblée peut avoir des effets de procédé au-delà de la seule couleur [3].

L'étape suivante est l'amélioration de la diffusion. Une fibre dont la surface hémicellulosique est partiellement ouverte présente moins de barrières pour les agents oxydants. Les composés de lignine résiduelle deviennent plus exposés, ce qui peut améliorer la performance d'un traitement ECF, d'un blanchiment au peroxyde ou d'une séquence faiblement alcaline selon la pâte considérée [1][7].

Enfin, les fragments solubilisés et les composés associés peuvent être éliminés lors du lavage ou des étapes suivantes. Le bénéfice dépend alors fortement de la qualité du lavage, de la consistance, du mélange, du pH, de la température et du temps de contact, car une réaction enzymatique efficace

nécessite que l'enzyme atteigne réellement les zones de xylane pertinentes dans la pâte <sup>[2][6]</sup>.

## Applications principales en pâte et papier

---

### Pré-blanchiment des pâtes kraft

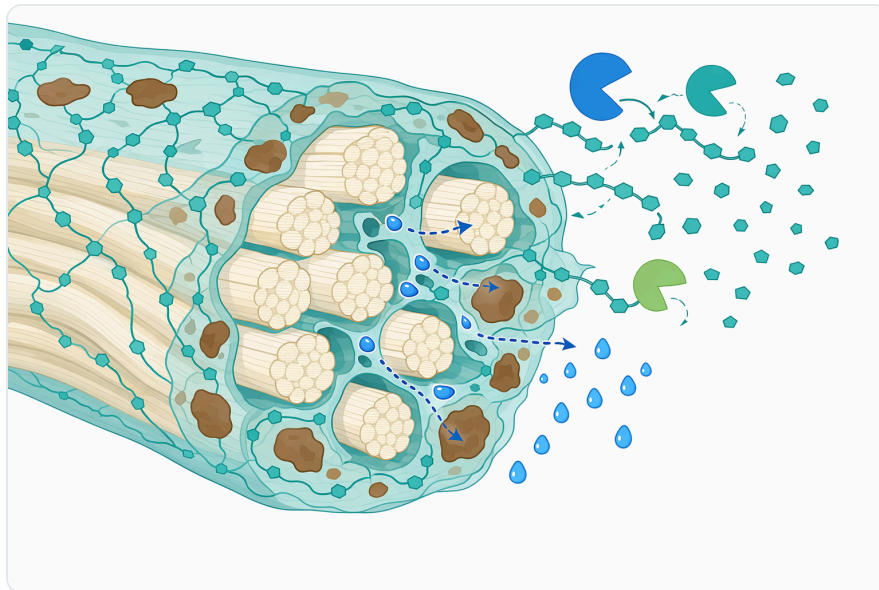
L'application la mieux établie est le pré-blanchiment des pâtes kraft. Les travaux sur l'application d'une xylanase alcaline produite par *Trichoderma reesei* au blanchiment de pâte de vieux papiers, ainsi que les études sur des xylanases alcalines issues de microorganismes adaptés, montrent que cette classe d'enzymes est pertinente pour améliorer la réponse de la pâte au blanchiment <sup>[1][9][6]</sup>.

Dans une pâte kraft, la xylanase est généralement introduite avant une étape chimique de blanchiment. Son rôle consiste à préparer la fibre en modifiant le xylane de surface ; l'action principale reste ensuite assurée par les réactifs de blanchiment. Cette logique permet de parler de "bleach boosting" plutôt que de remplacement direct du procédé chimique <sup>[1][2]</sup>.

L'intérêt industriel est double : améliorer la blancheur à séquence donnée ou viser une performance équivalente avec une intensité chimique réduite. Les résultats exacts varient selon l'essence, le degré de délignification, la teneur en xylane, la qualité du lavage et les conditions de réaction, mais le principe de l'amélioration de la blanchissabilité par xylanase est cohérent avec les études disponibles <sup>[3][6]</sup>.

### Blanchiment au peroxyde et pâtes à haut rendement

Les pâtes à haut rendement, comme certaines pâtes chimico-thermomécaniques, conservent davantage de lignine que les pâtes chimiques fortement délignifiées. Leur blanchiment repose souvent sur des systèmes au peroxyde, et la matrice fibreuse peut être moins accessible qu'une pâte chimique bien lavée <sup>[7]</sup>.



**Figure 2.** 섬유 수준에서 자일라나아제는 리그닌을 직접 산화하거나 셀룰로오스를 분해하는 것이 아니라 헤미셀룰로오스에 작용한다.

Une étude récente sur le prétraitement xylanase-pectinase avant blanchiment au peroxyde d'hydrogène faiblement alcalin d'une pâte chimico-thermomécanique de peuplier illustre cette direction technique. Le recours à des enzymes ciblant différentes fractions de la matrice végétale peut améliorer la cinétique et l'efficacité environnementale du blanchiment, tout en restant dépendant des conditions propres à la pâte traitée <sup>[7]</sup>.

Cette approche ne signifie pas qu'une xylanase seule sera optimale dans tous les cas. Les pâtes mécaniques et à haut rendement contiennent des proportions importantes de lignine, pectines, extractibles et fines ; des combinaisons enzymatiques peuvent donc être étudiées lorsque la limitation ne provient pas uniquement du xylane <sup>[7][2]</sup>.

### Traitement des fibres recyclées et vieux papiers

Les fibres recyclées présentent une composition variable : encres résiduelles, charges minérales, colles, fines, amidon, fibres raccourcies et contaminants peuvent modifier la réponse au traitement enzymatique. Les xylanases sont étudiées dans ce contexte parce qu'elles peuvent contribuer à améliorer la propreté ou la blanchissabilité de la pâte récupérée, notamment lorsque le xylane ou d'autres hémicelluloses limitent l'accès aux surfaces fibreuses <sup>[1][10]</sup>.

L'étude sur l'utilisation de vieux papiers comme substrat inducteur pour la production simultanée de cellulase et de xylanase montre aussi l'intérêt du papier récupéré dans une logique de valorisation et d'économie circulaire. Même si ce type de travail porte sur la production enzymatique plutôt que sur

l'application directe en machine, il souligne le lien entre recyclage papetier, enzymes lignocellulosiques et procédés plus sobres <sup>[10]</sup>.

Dans le désencrage ou la préparation de pâte recyclée, il faut cependant éviter les généralisations. Les effets d'une xylanase dépendent du type de papier récupéré, du niveau de contamination, de la formulation chimique de désencrage, du pH et du mélange. L'enzyme doit donc être envisagée comme un levier de procédé, non comme une correction universelle de la variabilité des matières recyclées <sup>[2]</sup> <sup>[1]</sup>.

### **Fibres non ligneuses, bambou et matières lignocellulosiques alternatives**

Les procédés papetiers s'intéressent aussi aux fibres non ligneuses et à certaines biomasses alternatives. Les stratégies de réduction d'empreinte carbone pour les pâtes kraft blanchies de bambou, dans des modèles intégrés forêt-pâte-papier, montrent que le choix des matières premières et des séquences de traitement reste un enjeu industriel et environnemental majeur <sup>[11]</sup>.

Dans ces matières, la proportion d'hémicelluloses, de silice, d'extractibles ou de lignine peut différer fortement du bois classique. Une xylanase alcaline peut être utile si le xylane constitue une barrière significative à la diffusion des réactifs ; toutefois, la réponse doit être interprétée selon la structure spécifique de la fibre et la séquence de cuisson ou de blanchiment <sup>[2]</sup><sup>[6]</sup>.

Les travaux sur des xylanases provenant de sols alcalins ou de boues d'eaux usées alcalines montrent pourquoi les chercheurs explorent des environnements extrêmes : ils recherchent des enzymes naturellement adaptées aux conditions de pH rencontrées dans certains procédés industriels, y compris la papeterie <sup>[4]</sup><sup>[9]</sup>.



**Figure 3.** 산성, 중성, 알칼리성 자일라나아제는 공정 적합성이 서로 다르며, 알칼리성 자일라나아제는 많은 크라프트 공정, 추출 공정, 과산화물 공정 및 재생 섬유 환경에 가장 잘 맞는다.

## Comparaison avec d'autres approches de blanchiment et de préparation de pâte

Approche de procédé	Principe technique	Avantages potentiels	Limites à considérer
Blanchiment chimique seul	Oxydation ou extraction chimique de la lignine résiduelle	Procédé bien établi, pilotable, compatible avec les lignes existantes	Demande chimique potentiellement élevée si la lignine est masquée par le xylane ; charge d'effluent selon la séquence utilisée [3]
Prétraitement par xylanase alcaline	Hydrolyse partielle du xylane avant blanchiment	Amélioration de l'accessibilité de la fibre, effet de bleach boosting, potentiel de réduction de l'intensité chimique [1][2]	Efficacité dépendante du pH, de la température, du temps de contact, de la pâte et du lavage [6]
Combinaison xylanase-pectinase	Action sur plusieurs composants non cellulosiques de la matrice fibreuse	Pertinente pour certaines pâtes à haut rendement ou systèmes au peroxyde faiblement alcalin [7]	Plus complexe à optimiser ; l'effet dépend de la contribution réelle des pectines et du xylane dans la limitation du blanchiment [7]
Modification extensive du xylane	Élimination ou réduction plus marquée du xylane	Peut modifier les propriétés de surface et certaines interactions fibreuses [3]	Une modification trop importante des hémicelluloses peut influencer la rétention, les interactions colloïdales et les propriétés de la pâte [3]

Cette comparaison montre que la xylanase alcaline occupe une position intermédiaire : elle n'est ni un simple additif sans action structurale, ni une substitution complète aux produits de blanchiment. Elle agit sur une cause précise de limitation — l'accessibilité réduite par le xylane — et sa valeur dépend de la façon dont cette cause se manifeste dans la pâte traitée <sup>[2][3]</sup>.

## Propriétés recherchées dans une xylanase alcaline industrielle

---

Une xylanase destinée à la papeterie doit conserver une activité utile dans une fenêtre de pH compatible avec la ligne de traitement. Les hémicellulases alcalines font l'objet de revues spécifiques car leur stabilité en milieu alcalin conditionne leur pertinence pour le pulpage, le blanchiment, les textiles et d'autres procédés où les enzymes acides seraient moins adaptées <sup>[2]</sup>.

La robustesse thermique est également importante. Les pâtes sortent souvent de traitements chauds, et le refroidissement excessif avant traitement enzymatique peut être pénalisant pour l'intégration industrielle. Les recherches sur les xylanases robustes, thermo-alcalines ou améliorées par ingénierie de séquence répondent à cette contrainte de stabilité <sup>[8][4][5]</sup>.

La sélectivité vis-à-vis du xylane est un autre critère fonctionnel. Une xylanase utilisée en pré-blanchiment doit agir principalement sur les hémicelluloses visées, avec une action limitée sur la cellulose, afin de préserver les propriétés mécaniques recherchées dans la feuille finale. Les études sur l'élimination du xylane montrent que cette fraction influence les propriétés de fibres ; l'objectif est donc une modification contrôlée, pas une déstructuration non sélective <sup>[3]</sup>.

Les familles enzymatiques mentionnées dans la littérature, notamment GH10 et GH11, présentent des architectures et comportements différents. Des travaux décrivent par exemple une xylanase GH10 issue de sol alcalin et une xylanase alcaline Xyn11A-LC de *Bacillus* améliorée pour son alkalophilie, illustrant la diversité des solutions enzymatiques possibles pour des conditions industrielles alcalines <sup>[4][5]</sup>.

## Conditions de procédé qui influencent la performance

---

Le pH est déterminant, car l'état ionique de l'enzyme, du substrat et de la pâte influence la catalyse. Une xylanase alcaline est choisie pour conserver une activité utile dans une zone de pH plus élevée qu'une xylanase strictement acide, mais elle reste une protéine catalytique avec une fenêtre de fonctionnement ; hors de cette fenêtre, son efficacité peut diminuer <sup>[2][12]</sup>.

La température joue un rôle similaire. Une température suffisante accélère généralement les réactions enzymatiques jusqu'à une limite, mais une température trop élevée peut réduire la stabilité de la protéine. C'est la raison pour laquelle les xylanases thermostables ou thermo-alkalines sont largement étudiées pour la pâte et le papier [8][4].

La consistance de pâte et le mélange conditionnent l'accès de l'enzyme aux fibres. Si la pâte est mal dispersée, l'enzyme peut rester concentrée dans certaines zones et ne pas atteindre uniformément le xylane de surface. Les travaux appliqués au blanchiment de pâtes et aux xylanases alcalines soulignent que l'effet observé résulte autant de l'enzyme que de son intégration correcte dans le procédé [1][6].

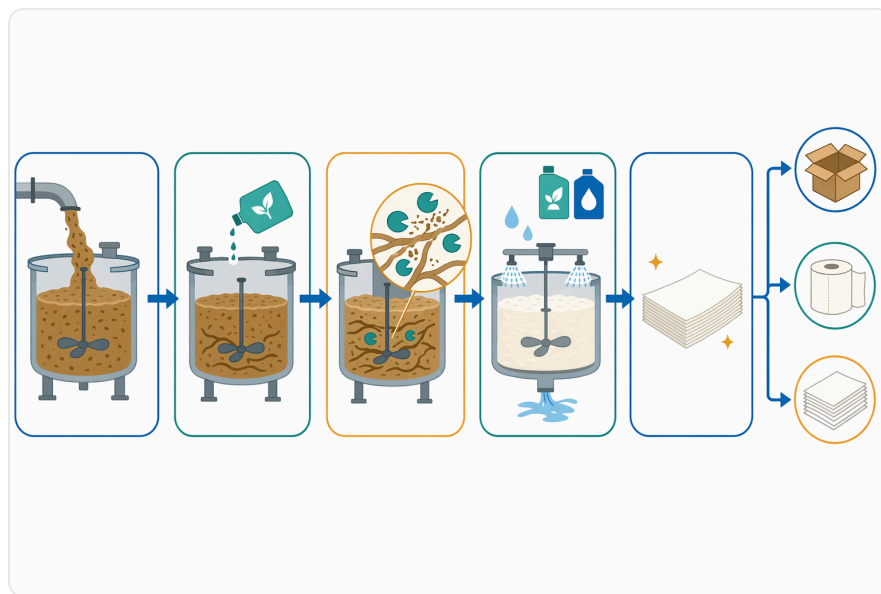


Figure 4. 크라프트 펄프 표백 보조 공정에서 자일라나아제는 보통 주요 산화 표백 단계 전에 투입되어 리그닌의 접근성을 높인다.

La composition chimique résiduelle de la pâte est également critique. Des oxydants, des niveaux élevés d'alcalinité, certains métaux ou des produits chimiques résiduels peuvent affecter la stabilité enzymatique ou modifier le substrat. En pratique, l'étape enzymatique est donc positionnée là où l'enzyme peut agir avant d'être exposée à des conditions incompatibles avec sa fonction [2][7].

## Effets attendus sur la qualité de pâte et les effluents

Le premier effet attendu est l'amélioration de la blanchissabilité. En rendant les résidus de lignine plus accessibles, la xylanase peut permettre aux agents de blanchiment d'agir plus efficacement. Les études d'application sur pâte de vieux papiers et dans l'industrie pâte-papier soutiennent cette utilisation comme traitement préparatoire [1][6].

Un second effet possible est la réduction de l'intensité chimique nécessaire pour atteindre un objectif de procédé. Cette réduction n'est pas automatique ni uniforme, mais elle constitue l'un des motifs principaux de l'utilisation des xylanases en bioblanchiment. Les hémicellulases alcalines sont étudiées précisément parce qu'elles permettent d'intervenir de manière ciblée dans des conditions plus compatibles avec les lignes industrielles [2][9].

Sur le plan environnemental, l'intérêt est lié à la diminution potentielle de la charge chimique et à l'amélioration de l'efficacité des séquences existantes. Les stratégies de production papetière plus propres ne reposent pas sur un levier unique : elles associent choix des matières premières, optimisation énergétique, valorisation des coproduits et réduction des intrants. Les travaux sur la valorisation du carbonate de calcium à partir de boues de chaux et sur les stratégies bas carbone dans les pâtes kraft illustrent cette logique systémique [13][11].

La xylanase alcaline doit donc être positionnée comme un élément d'une stratégie d'optimisation, non comme une solution isolée à tous les impacts du procédé. Sa contribution peut être significative lorsque la limitation vient du xylane, mais elle doit être combinée à un lavage efficace, une séquence de blanchiment adaptée et un pilotage cohérent des paramètres de production [3][7].

## Points de vigilance techniques

---

Le principal point de vigilance est la variabilité des pâtes. Deux usines utilisant le même type général de procédé peuvent obtenir des réponses différentes, parce que l'essence de bois, la cuisson, le lavage, le taux de lignine résiduelle, la teneur en xylane et les additifs présents ne sont pas identiques [3][6].

Il faut aussi éviter de confondre l'action sur le xylane avec une délignification enzymatique directe. Une xylanase ne cible pas prioritairement la lignine ; elle améliore plutôt l'accès aux composés de lignine résiduelle et facilite leur élimination ultérieure par les étapes chimiques ou de lavage. Cette nuance est essentielle pour interpréter correctement les performances observées [2][3].

Une modification trop forte des hémicelluloses peut également avoir des conséquences sur les propriétés de fibre. Le xylane influence les interactions de surface, la rétention et certains comportements colloïdaux ; l'objectif industriel est donc une hydrolyse utile et contrôlée, pas une élimination maximale du xylane dans tous les cas [3].



**Figure 5.** 자일라나아제는 자일란이 접근성을 제한하는 경우 크라프트 펄프 표백, 비목재 펄프 처리, 회수섬유 탈묵, 더 깨끗한 섬유 처리 공정을 지원할 수 있다.

Enfin, les résultats issus de la littérature doivent être lus comme des démonstrations dans des contextes définis. Une xylanase produite par un microorganisme donné, appliquée à une pâte particulière et dans une séquence spécifique, ne garantit pas une transposition quantitative identique sur toutes les lignes. Les études sur les xylanases alcalines montrent un potentiel industriel solide, mais la performance finale reste liée au procédé <sup>[1][4][6]</sup>.

## Positionnement du produit Enzymes.bio

**Industrial Alkaline Xylanase For Pulp And Paper Processing** est proposé comme enzyme technique pour les applications de pâte et papier où l'hydrolyse ciblée du xylane peut améliorer la préparation de pâte, le pré-blanchiment ou l'efficacité des traitements en aval. Le produit est vendu directement en ligne par unité de 1 kg, avec CoA et SDS fournis avec la commande .

Ce positionnement correspond à une logique de fourniture B2B : Enzymes.bio rend le produit disponible à l'achat, sans se présenter comme fabricant ni comme laboratoire d'analyse. Les documents associés à la commande servent à accompagner l'usage et la conformité documentaire du produit, tandis que l'intégration industrielle dépend du procédé papetier de l'utilisateur .

Dans une formulation technique juste, la xylanase alcaline doit être décrite comme un **auxiliaire enzymatique ciblé**. Elle peut soutenir le blanchiment, réduire l'effet barrière du xylane, faciliter l'accès aux résidus de lignine et contribuer à des procédés plus efficaces, mais elle ne remplace pas à elle seule la conception de la séquence de blanchiment ni le contrôle des paramètres de ligne <sup>[1][2][3]</sup>.

## Conclusion technique

---

La xylanase alcaline industrielle est l'une des enzymes les plus pertinentes pour les procédés papetiers lorsque le xylane limite l'accessibilité de la fibre aux agents de blanchiment. Son action repose sur l'hydrolyse partielle des hémicelluloses xylaniques, ce qui peut améliorer la perméabilité, favoriser l'élimination de composés associés à la lignine et renforcer l'efficacité des étapes chimiques suivantes [2][3].

Les applications les mieux documentées concernent le pré-blanchiment des pâtes kraft, le traitement de certaines pâtes recyclées, les séquences au peroxyde et les approches combinées avec d'autres enzymes pour les pâtes à haut rendement. Les travaux sur les xylanases alcalines, thermo-alcalines et issues d'environnements alcalins confirment l'intérêt de cette famille enzymatique pour des conditions compatibles avec la papeterie industrielle [1][7][4][9].

La valeur pratique de l'enzyme dépend toutefois de la pâte, du pH, de la température, du mélange, du lavage et de la séquence de blanchiment. Utilisée correctement, une xylanase alcaline n'est pas une promesse générique de blancheur, mais un levier précis d'optimisation : elle aide le procédé existant à mieux exploiter les étapes de blanchiment, avec un potentiel de réduction de l'intensité chimique et d'amélioration environnementale lorsque le contexte fibreux s'y prête [2][6].

### Commander Industrial Alkaline Xylanase For Pulp And Paper Processing en ligne

Vendu par unité de 1 kg, en stock et prêt à expédier. Commandez directement sur notre boutique — payez en ligne et nous traitons votre commande. Un certificat d'analyse et une fiche de données de sécurité sont inclus avec chaque commande.

[Acheter Industrial Alkaline Xylanase For Pulp And Paper Processing →](#)

## Références

---

Numérotées par ordre de première citation. Sources en libre accès, chacune vérifiée comme accessible au moment de la publication ; les numéros de citation dans le texte renvoient ici.

1. Ma, Q., & Yang, R. (2015). Alkaline Xylanase Produced by *Trichoderma reesei*: Application in Waste Paper Pulp Bleaching. *Bioresources*, 10, 8048-8057.
2. Mamo, G. (2019). Alkaline Active Hemicellulases. *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*.

3. Lyytikäinen, K. (2017). Removal of xylan from birch kraft pulps and the effect of its removal on fiber properties, colloidal interactions and retention in papermaking.
4. Qiu, H., Li, Z., Wang, H., Li, S., & Zhang, T. (2016). A Novel GH10 Xylanase Xyn13-3 from Alkaline Soil: Gene Cloning and Heterogenous Expression.
5. Bai, W., Cao, Y., Liu, J., Wang, Q., & Jia, Z. (2016). Improvement of alkalophilicity of an alkaline xylanase Xyn11A-LC from Bacillus sp. SN5 by random mutation and Glu135 saturation mutagenesis. *BMC Biotechnology*, 16.
6. Gupta, G. (2014). Studies on Production of Alkaline Xylanase from Melanocarpus albomyces IIS 68 under Submerged Condition and its Application in Pulp and Paper Industry.
7. Li, J., Zha, Y., Wang, H., & Hou, Q. (2026). Kinetic and environmental effects of xylanase-pectinase pretreatment-mediated weakly alkaline hydrogen peroxide bleaching of poplar chemi-thermomechanical pulp. *Wood Science and Technology*, 60.
8. Sun, D., Qi, H., Dou, G., Mao, S., Lu, F., Tian, K., & Qin, H. (2024). Ancestral sequence reconstruction of a robust  $\beta$ -1,4-xylanase and efficient expression in Bacillus subtilis. *International Journal of Biological Macromolecules*, 137188 .
9. Zhao, Y., Luo, H., Meng, K., Shi, P., Wang, G., Yang, P., Yuan, T., ... et al. (2011). A Xylanase Gene Directly Cloned from the Genomic DNA of Alkaline Wastewater Sludge Showing Application Potential in the Paper Industry. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 165, 35-46.
10. Dong, M., Wang, S., Xu, F., Xiao, G., & Bai, J. (2021). Efficient utilization of waste paper as an inductive feedstock for simultaneous production of cellulase and xylanase by Trichoderma longiflorum. *Journal of Cleaner Production*.
11. Song, J., Liu, L., Lyu, X., Xia, B., Cheng, Z., Lu, B., Xu, Q., ... et al. (2026). Carbon footprint management and net-zero strategies for bleached kraft bamboo pulps under forestry-pulp-paper integration. *Journal of Environmental Management*, 404, 129482 .
12. Tiwari, R., & Mahalpure, G. S. (2025). A Detailed Review of pH and its Applications. *Journal of Pharmaceutical and Biopharmaceutical Research*.
13. Geng, C., Ma, T., & Liu, J. (2021). Eco-environmental benefits analysis of EcoPartnerships program of production technology of calcium carbonate from lime mud produced by alkaline papermaking. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 40.

## Contacter Enzymes.bio

Des questions sur une commande ? Notre équipe se fera un plaisir de vous aider.

E-MAIL [wholesale@enzymes.bio](mailto:wholesale@enzymes.bio)

TÉLÉPHONE (ÉTATS-UNIS) **+1 (507) 428-6057**

[Nous contacter →](#)



**400+** Clients B2B



**60+** partenaires de recherche universitaires



**54** servis dans le monde entier