

Conception de médias filtrants écoresponsables par électrofilage contre les aérosols de particules ultrafines

Humain, technologie et prévention : trouver l'équilibre

Adnan MASRI^{1,3}

Loïc WINGERT^{2,3}, Ludwig VINCHES^{1,3}

1. Département de santé environnementale et santé au travail , Université de Montréal
2. IRSST – Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail
3. CReSP – Centre de recherche en santé publique

Plan

1. Contexte SST
2. Problématique
3. Objectifs
4. Méthodologies
5. Résultats
6. Conclusion
7. Limites et perspectives

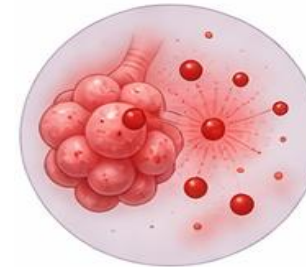
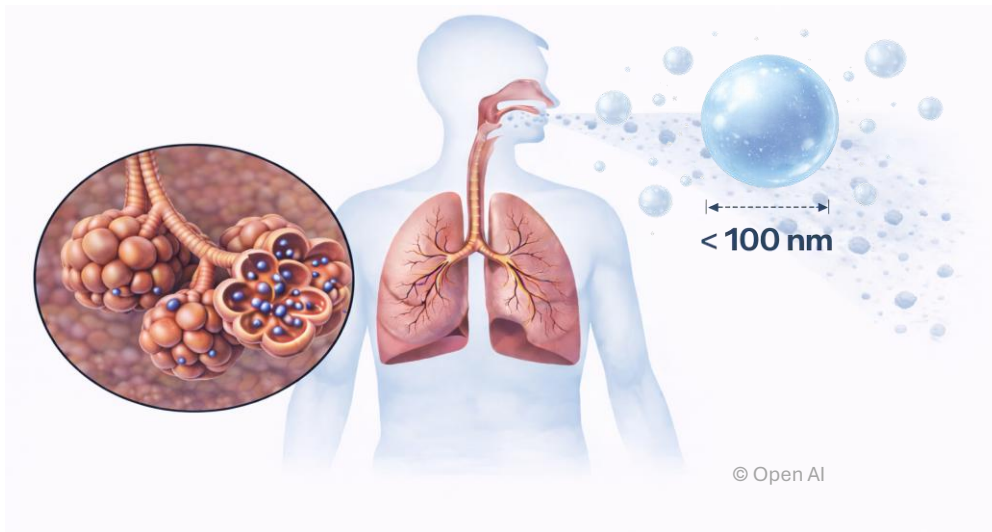
Risque d'exposition aux particules ultrafines

Sources d'exposition aux particules ultrafines (PUF)

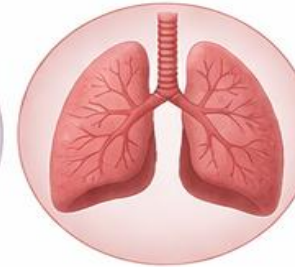


Pénétration des PUF

Effets potentiels sur la santé



**Stress oxydatif
et
inflammatoire**



**Effet
respiratoire**

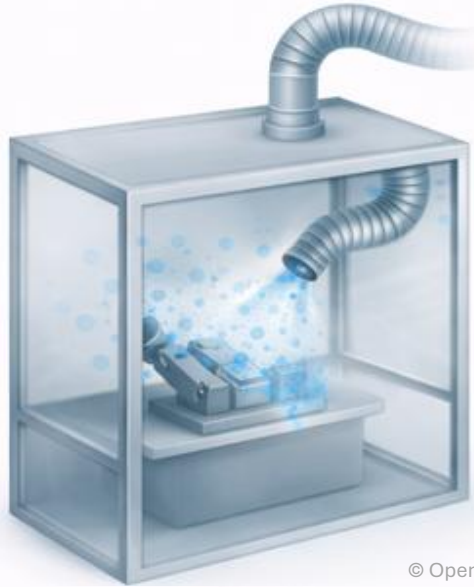


**Effet
cardiovasculaire**

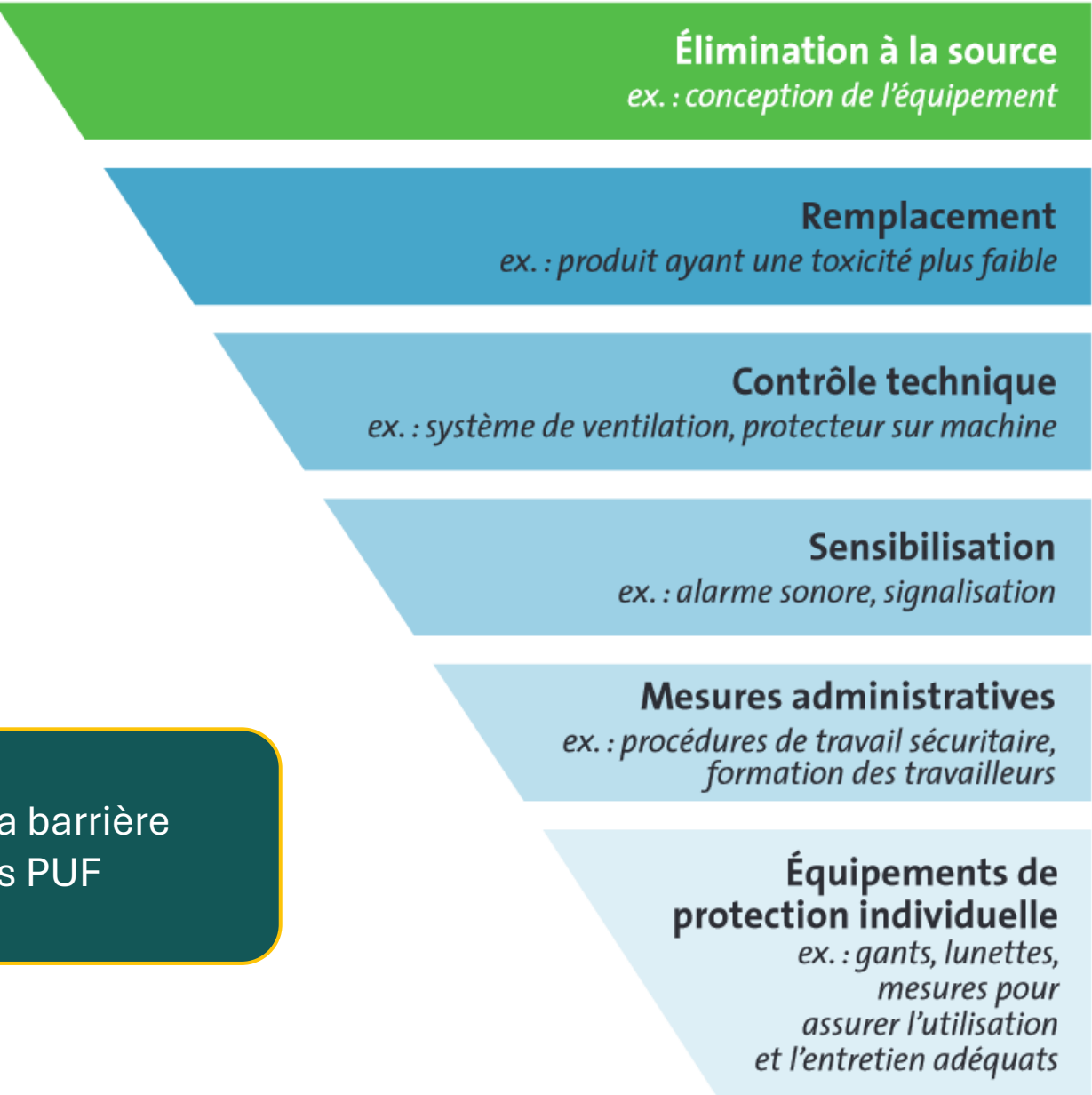


**Effet
neurologique**

Moyens de prévention



La **filtration de l'air** est la barrière principale contre les PUF



Problématique environnementale



Médias filtrants
principalement
en polypropylène



COVID-19 → ~**12 millions de tonnes**
de déchets de PP [1]



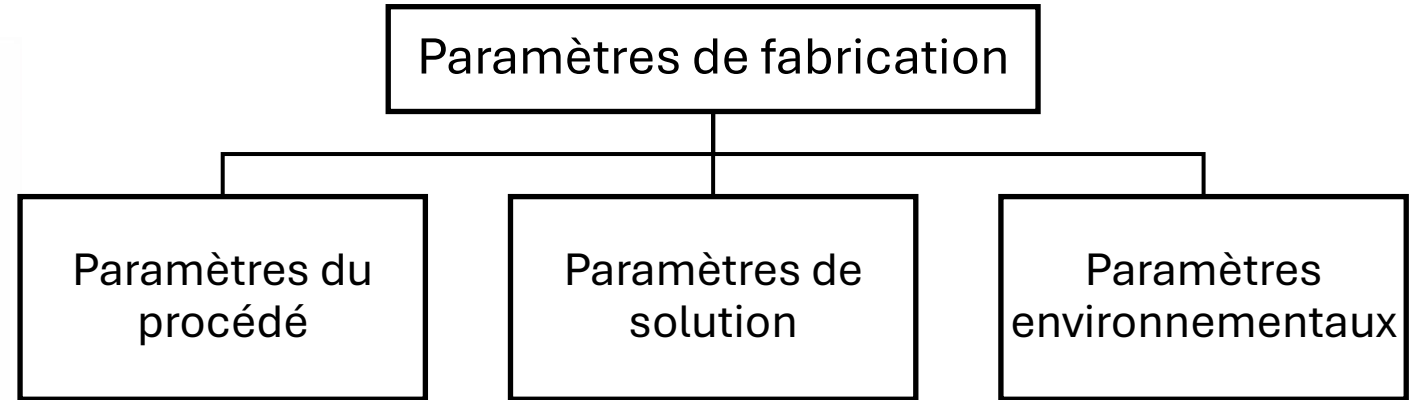
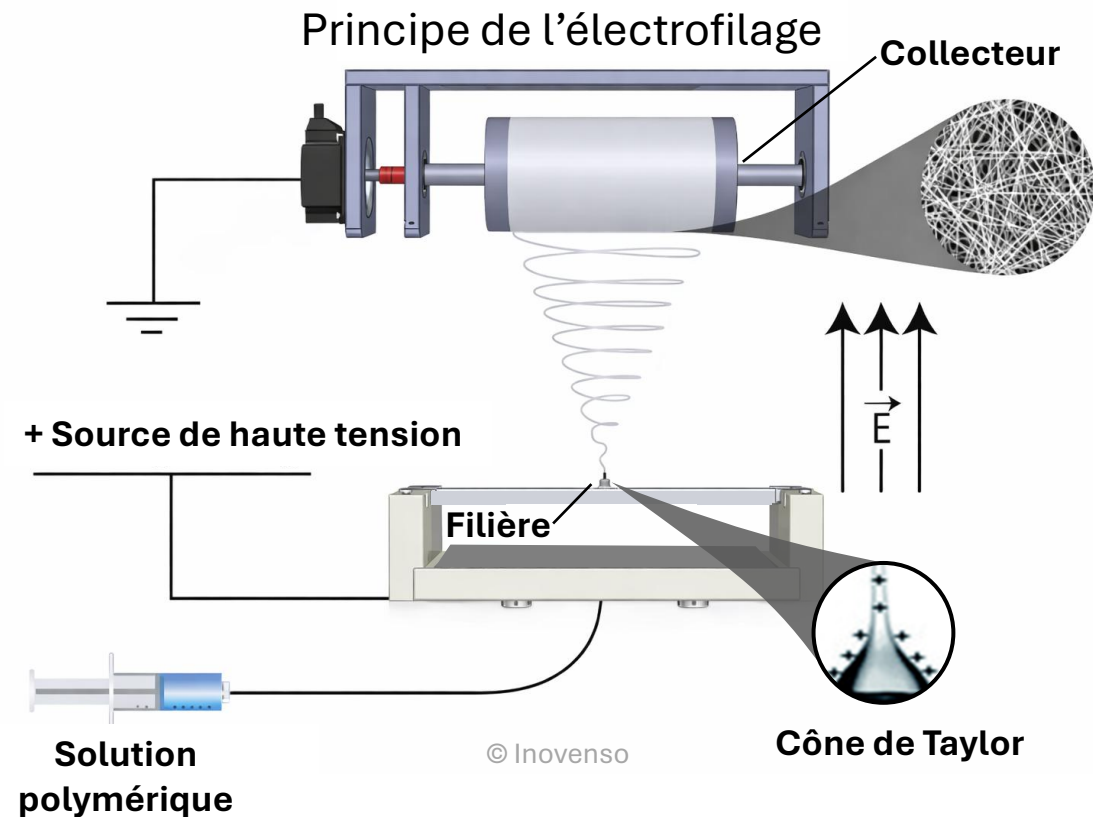
Le PP persiste
~**450 ans** [1]

Défi

Maintenir une performance de filtration élevée tout en réduisant l'impact environnemental

L'électrofilage : une approche durable pour la conception de médias filtrants écoresponsables

Électrofilage: Méthode efficace, relativement simple, polyvalente pour la conception de structures textiles non-tissées à base de fibres nanométriques (10 nm à 1 µm)



Avantages de l'électrofilage

- Fibres nanométriques
- Porosité interconnectée
- Surface spécifique élevée

Un candidat prometteur pour les médias filtrants écoresponsables de nouvelle génération

Électrofilage vert : opportunités et limites

- Acide polylactique (PLA) – biosourcé et biodégradable [2]
- Issu de ressources renouvelables (amidon de maïs, biomasse)
- Dégadable en 12 semaines (compost à 50 °C) [3]
- Réduction de la dépendance aux polymères d'origine pétrochimique



Problématique des solvants

- ! PLA électrofilable avec des solvants toxiques
- ! N,N-diméthylformamide (DMF) peut nuire à la fertilité ou au fœtus



[2] J. J. Kolstad, E. T. H. Vink, B. De Wilde, and L. Debeer (2012), "Assessment of anaerobic degradation of Ingeo™ polylactides under accelerated landfill conditions," *Polymer Degradation and Stability*.

[3] Karamanlioglu, M., & Robson, G. D. (2013). The influence of biotic and abiotic factors on the rate of degradation of poly(lactic) acid (PLA) coupons buried in compost and soil. *Polymer Degradation and Stability*.

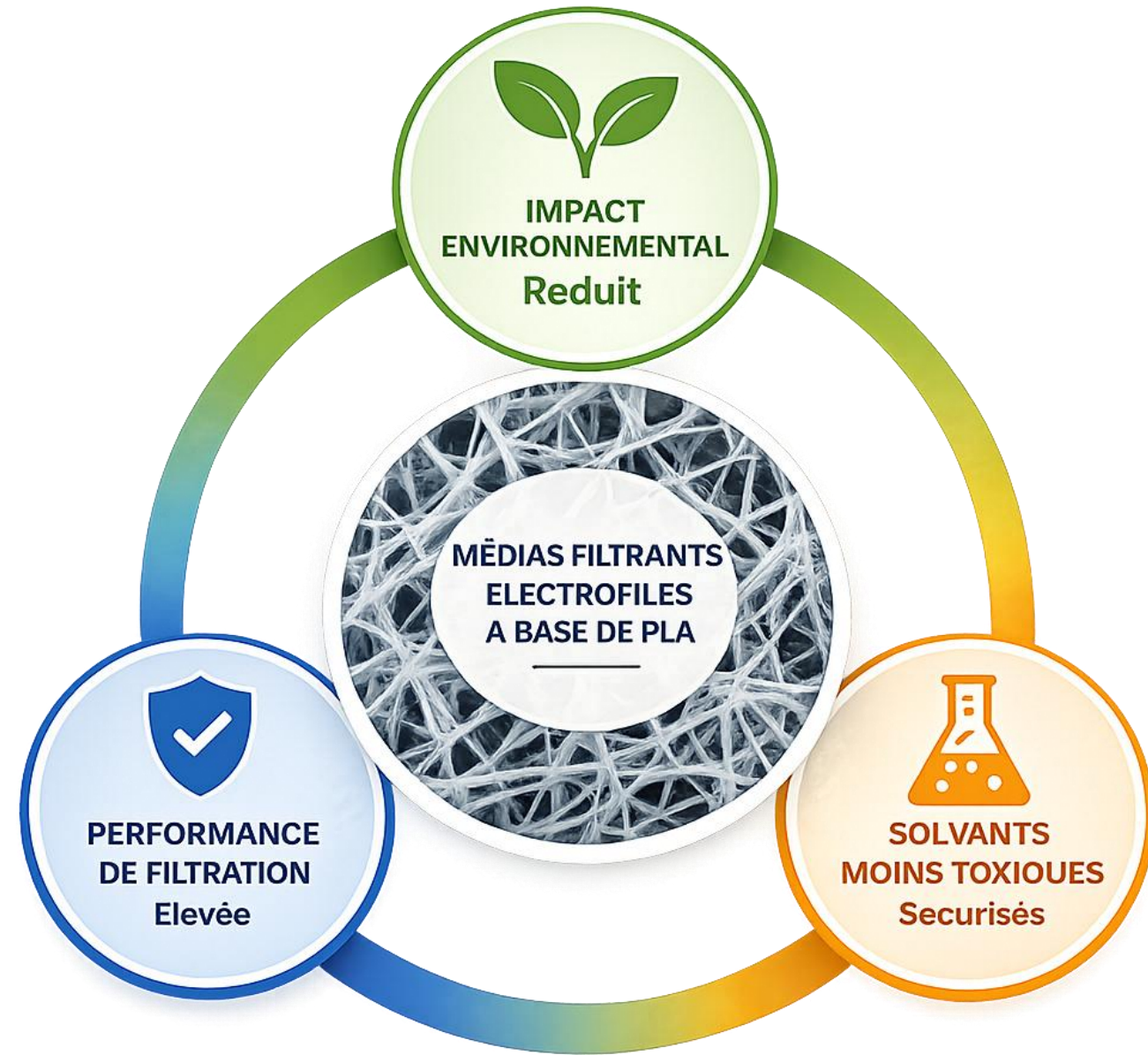
Objectifs de recherche

Objectif principal :

Développer des médias filtrants électrofilés écoresponsables à base de PLA en utilisant des solvants moins toxiques, combinant une haute performance de filtration et un impact environnemental réduit

Objectifs spécifiques :

- 1 Sélectionner des solvants moins toxiques
- 2 Optimiser les paramètres d'électrofilage
- 3 Établir le lien entre les paramètres de procédé, la structure et les performances de filtration



Sélection des solvants

Selon le guide de sélection des solvants **Chem 21** [4]



Solvants	Abréviation	Sécurité	Santé	Environnement	Classement
Solvants conventionnels [5]					
N,N-diméthylformamide	DMF	4	9	5	Dangereux
Acétone	A	5	3	5	Problématique
Solvants moins toxiques					
Carbonate de diméthyle	DMC	4	1	3	Recommandé
Cyclopentanone	CPO	4	2	3	Recommande

Message clé

- ✓ Le **carbonate de diméthyle (DMC)** et le **cyclopentanone (CPO)** répondent aux critères de solubilité du PLA tout en réduisant significativement les risques pour la santé et l'environnement

[4] D. Prat *et al.*, "CHEM21 selection guide of classical- and less classical-solvents,"

[5] J. S. C. Lo *et al.*, "Optimization of polylactic acid-based medical textiles via electrospinning for healthcare apparel and personal protective equipment,"

Stratégie expérimentale et plan d'étude

Étape 1 – Structure de référence (solvant conventionnel)



- Fabrication utilisant DMF/A
- Optimisation de la solution et du procédé
- Caractérisation structurale et efficacité de filtration



Étape 2 – Structure solvants moins toxiques



- Fabrication utilisant CPO/DMC
- Plan d'expériences détaillé
- Comparaison des performances avec la structure de référence

Plan d'expériences MRS (3 facteurs – 3 niveaux)

Facteurs :

- Tension
- Débit de solution
- Distance pointe–collecteur

Réponses mesurées

Caractérisation structurale :

- Morphologie et diamètre des fibres
- Épaisseur et porosité

Performances de filtration :

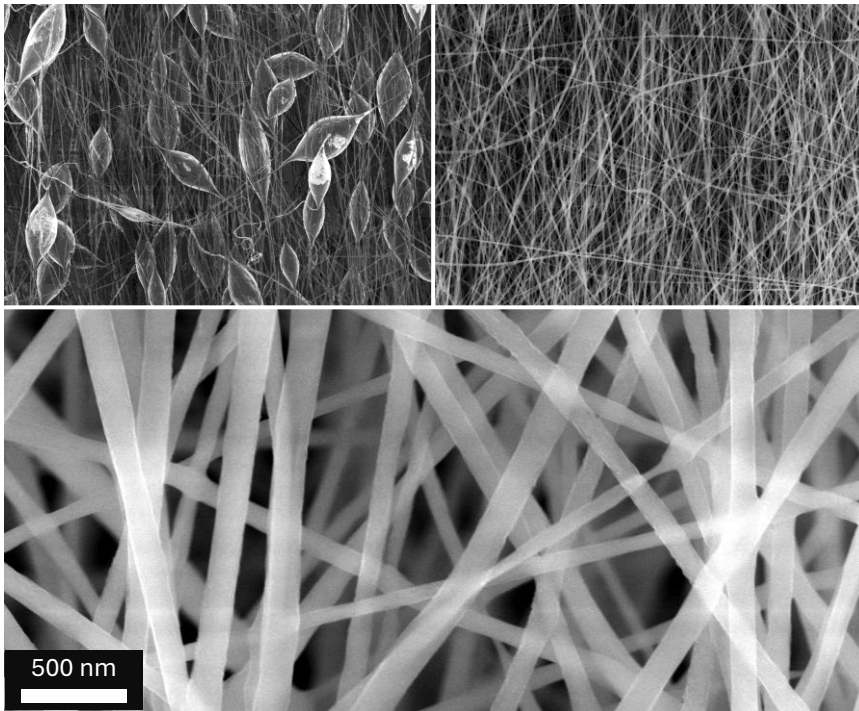
- Efficacité de filtration
- Perte de charge

Caractérisation structurelle

Morphologie et diamètre des fibres

Analyse MEB

- Fibres avec perles vs fibres continues
- Distribution des diamètres (≥ 100 fibres)



Épaisseur

ISO 9073 [6]

Gauge d'épaisseur digitale



Porosité

Prosimètre par intrusion de mercure

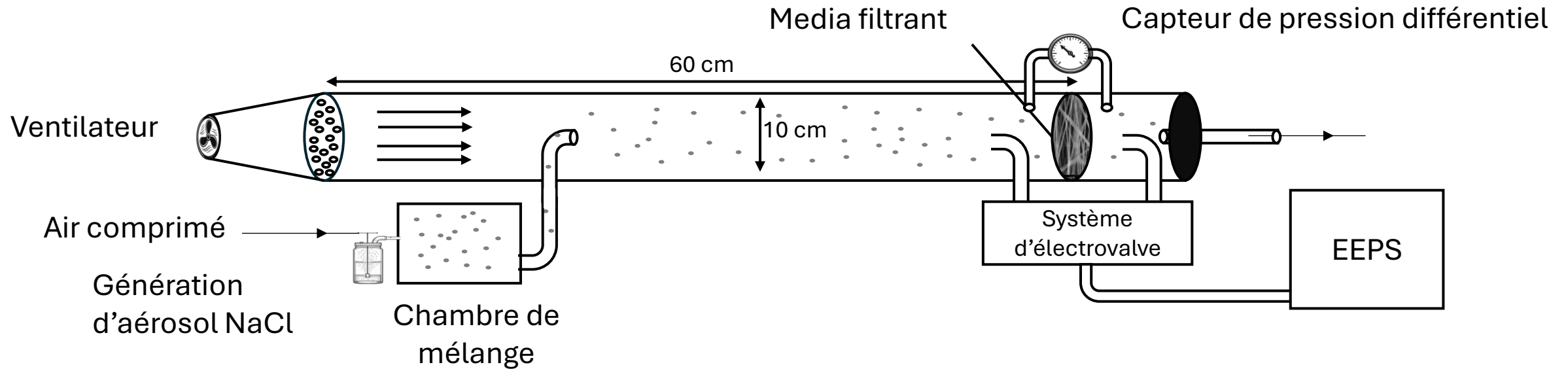
Porosité (%)



© Maples - UdeM

Performance de filtration

Performance de filtration évaluée à une vitesse frontale de 15 cm/s



Efficacité de collecte

$$E = 1 - \frac{C_{Aval}}{C_{Amont}}$$

Perte de charge

$$\Delta P = P_{Amont} - P_{Aval}$$

Structure référence

Les solvants conventionnels : (DMF/A)

Optimisation des paramètres de la solution

- Proportion des solvants
- Concentration massique en PLA

Optimisation des paramètres du procédé

- Voltage
- Débit de la solution
- Distance débit collecteur

 **Diamètre minimal – sans défaut**

Évaluation de la performance de la filtration





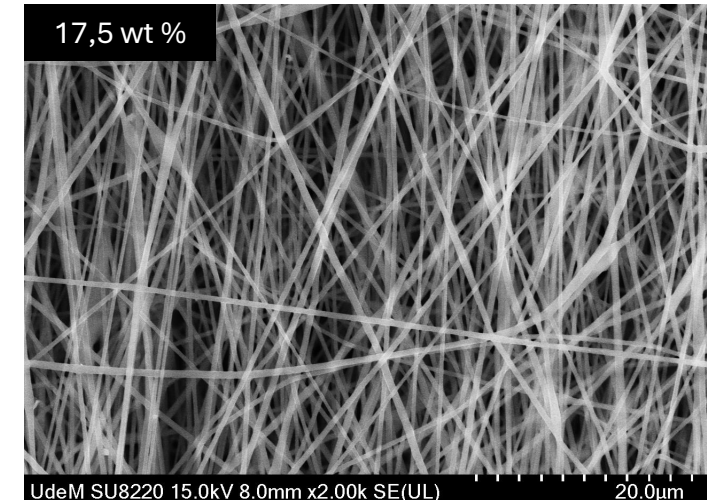
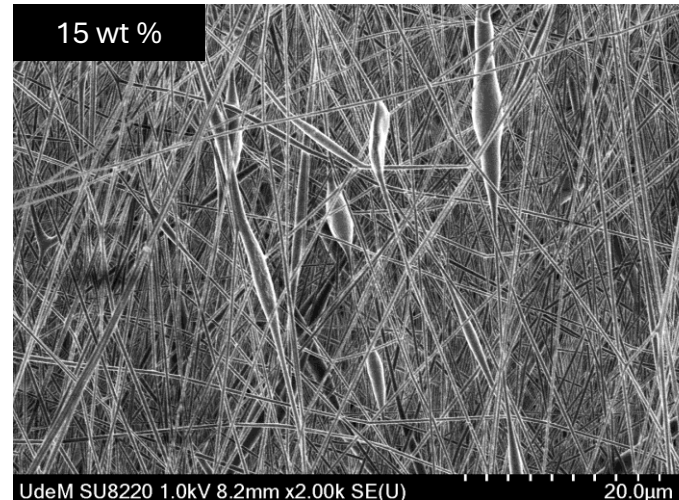
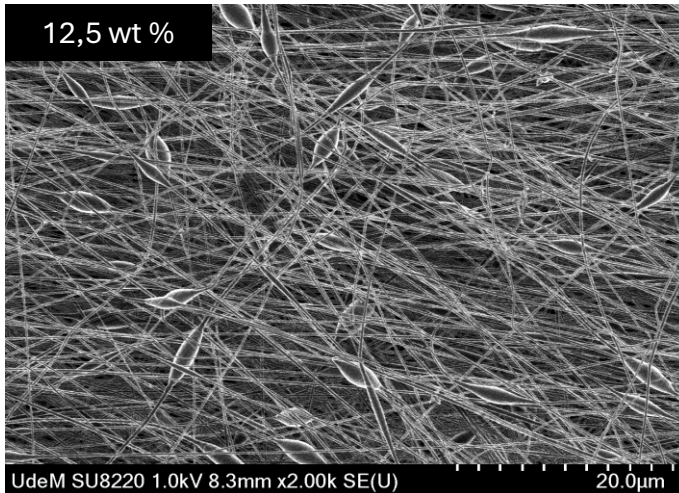
Structure référence – optimisation des paramètres de la solution

Proportion des solvants (DMF : Acétone)

- (DMF/acétone) 75/25 | 50/50 | 25/75
- Jet stable seulement à 75/25
- Colmatage de la filière pour les proportions plus élevées en acétone
- ✓ Sélection proportion 75/25

Concentration massique de PLA wt %

Voltage fixé à 20 kV | débit de la solution fixé à 1 mL/h | distance filière-collecteur fixé à 15 cm



- ✓ Morphologie optimale (sans perle) obtenue à partir de 17,5 wt%

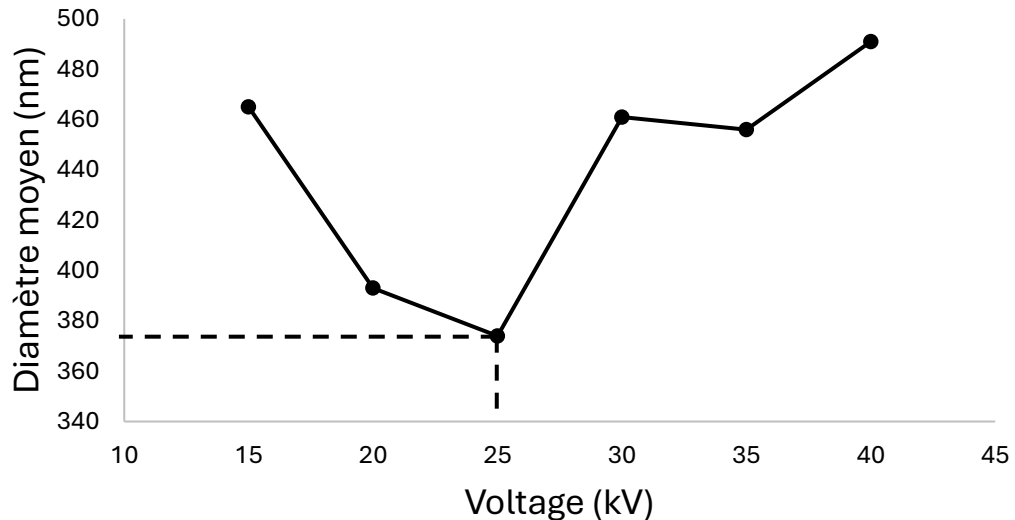


Structure référence

Optimisation des paramètres du procédé

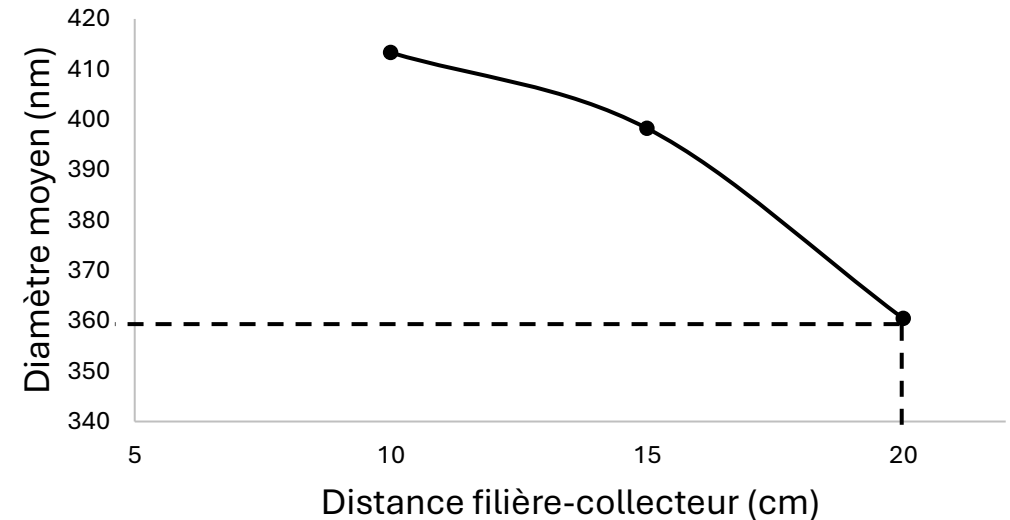
Effet du voltage

- Débit de la solution : 1 mL/h
- Distance filière-collecteur : 15 cm
- Voltage varié de 15 kV (tension seuil) à 40 kV



Effet de la distance filière-collecteur

- Voltage : 25 kV
- Débit de la solution : 1 mL/h
- Distance filière-collecteur variée de 10 cm à 20 cm



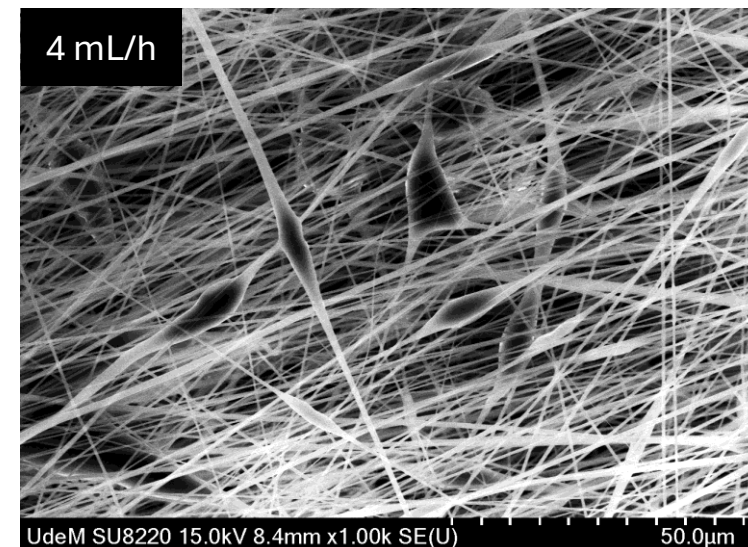
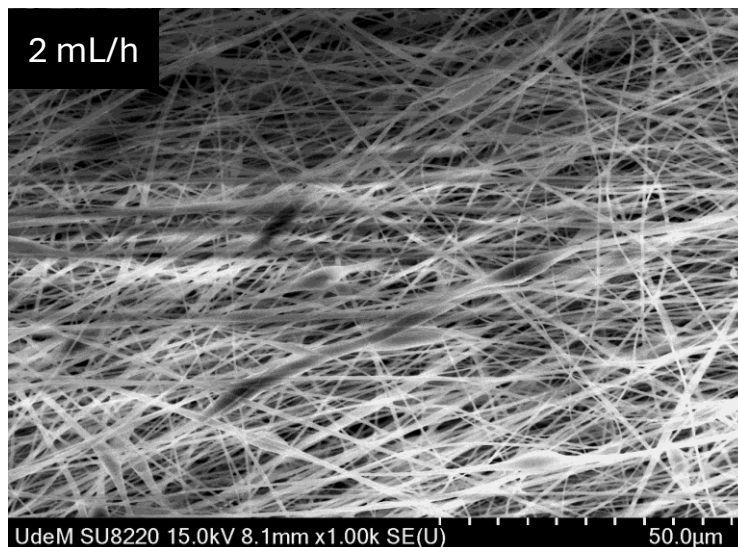
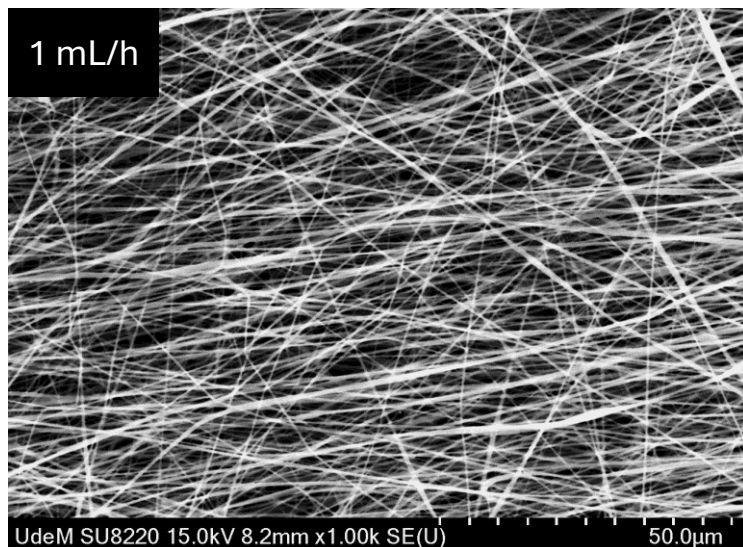


Structure référence

Optimisation des paramètres du procédé

Effet débit de la solution

- Voltage fixé : 25 kV | Distance filière-collecteur : 15 cm
- Débit de la Solution varié de 1 mL/h à 4 mL/h
- Seulement 1 mL/h donne des structures sans défaut





Structure référence

Paramètres optimaux

- Voltage : 25 kV
- Distance filière-collecteur : 20 cm
- Débit de la Solution : 1 mL/h
- Diamètre moyen minimal sans défaut

Diamètre moyen

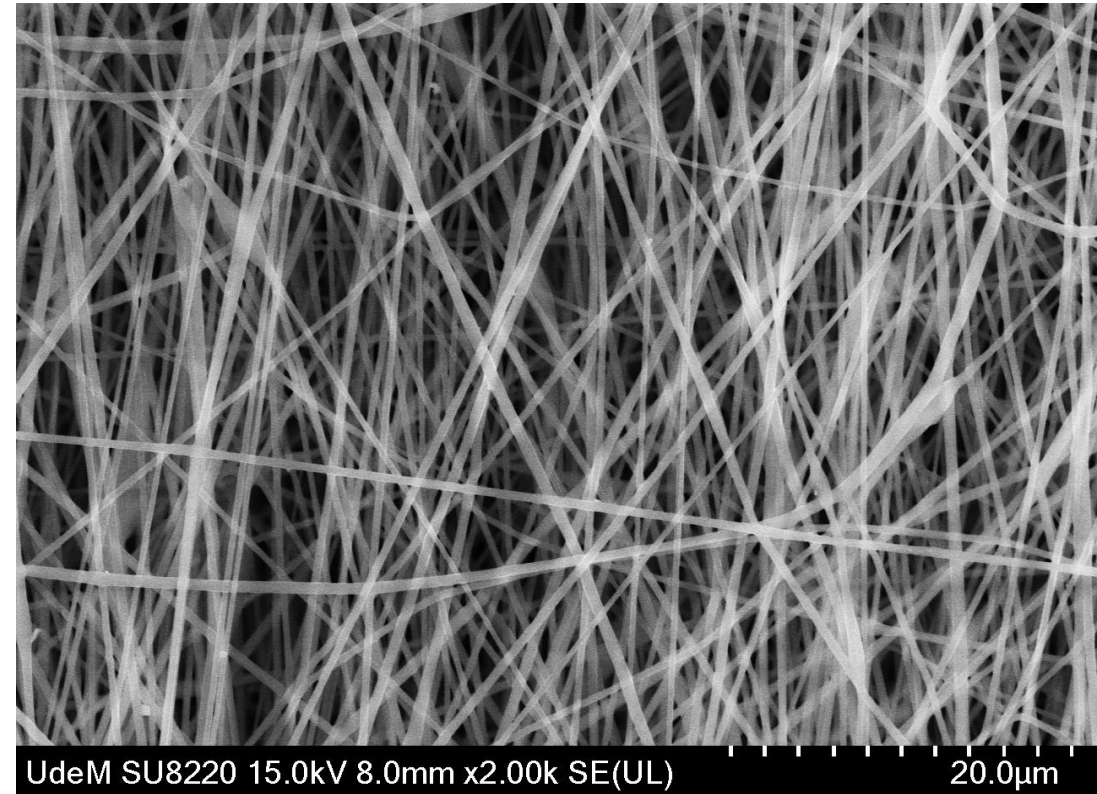
350 ± 90 nm

Épaisseur

192 ± 30 μm

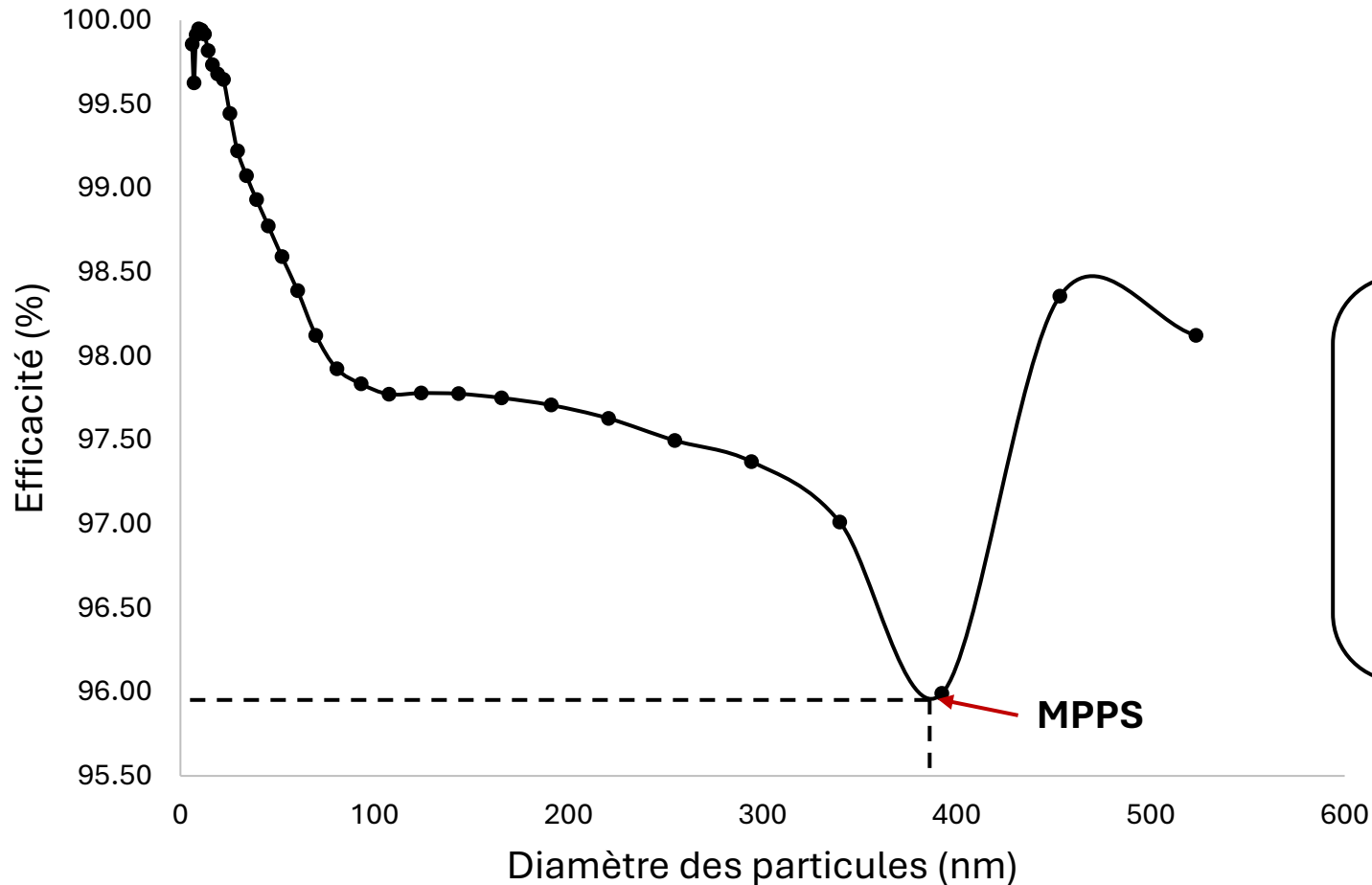
Porosité

52 %





Structure référence – Performance de filtration



Résumé de l'évaluation

- Taille des particules les plus pénétrantes
Most penetrating particle size
MPPS : 390 nm
- E_{\min} = 96 %
- **Perte de charge** : $12,5 \pm 0,2$ Pa

Systeme solvant moins toxique

Les solvants moins toxiques : (CPO/DMC)

Optimisation les paramètres de la solution


- Proportion des solvants
- Concentration massique en PLA

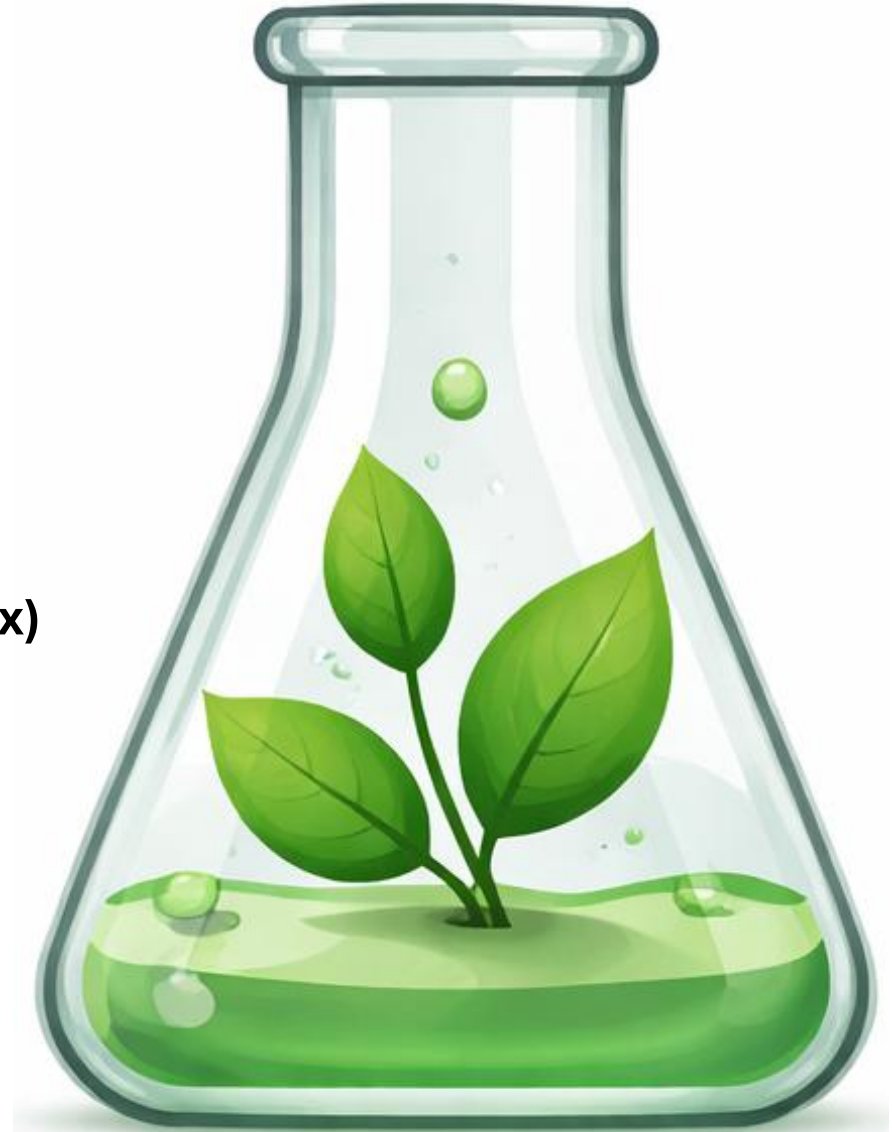
Plan expérimental détaillé

Méthodologie de surface de répons (MSR) (3 facteurs – 3 niveaux)

- Voltage : (20 kV – 35 kV)
- Débit solution : (0,5 mL/h – 1,5 mL/h)
- Distance filière – collecteur : (10 cm – 20 cm)

Comparaison de performance avec la structure référence

 **Objectif:** réduire la toxicité sans compromettre les performances





Systeme solvant moins toxique

Résultats optimisation structurelle

Solution paramètre

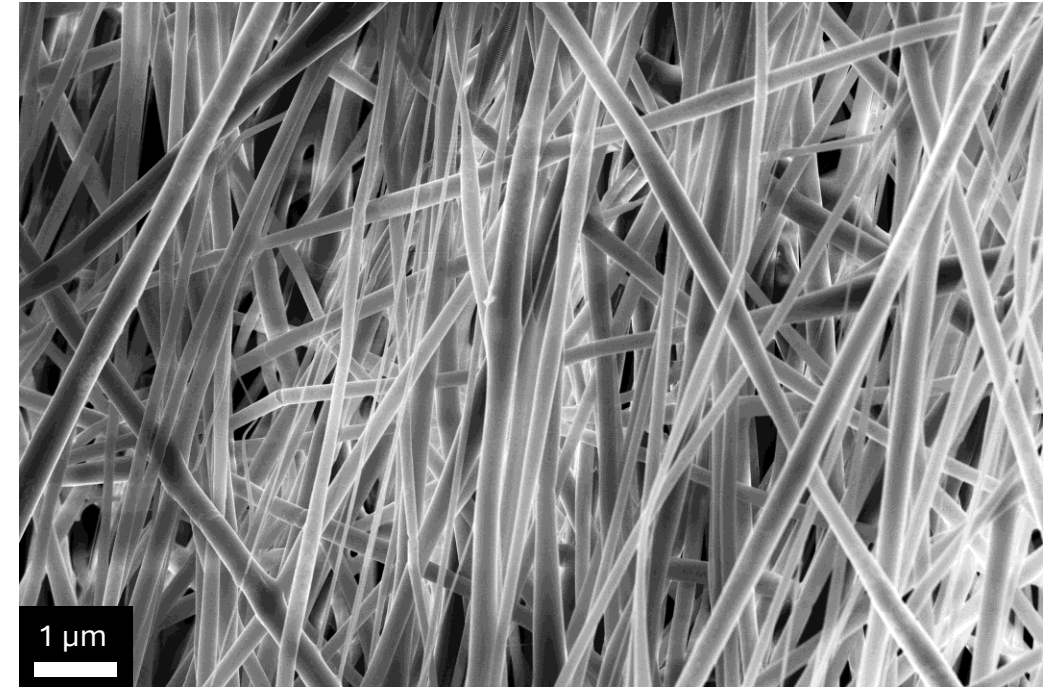
- **CPO/DMC (75/25)** donne un jet stable
- **PLA 17,5 wt%** produit une structure sans défaut

Effet paramètre du procédé (MRS – ANOVA)

- Seulement le **voltage** et le **débit de la solution** a un effet significatif sur le diamètre des fibres
- Minimum à **35 kV** et **0,5 mL/h**

Message clé

- La formulation à base de solvants moins toxiques reproduit la qualité structurelle du système de référence
- **35 kV | 0,5 mL/h | 20 cm** diamètre moyen **450 ± 100 nm**
- Épaisseur: **130 ± 25 μm**



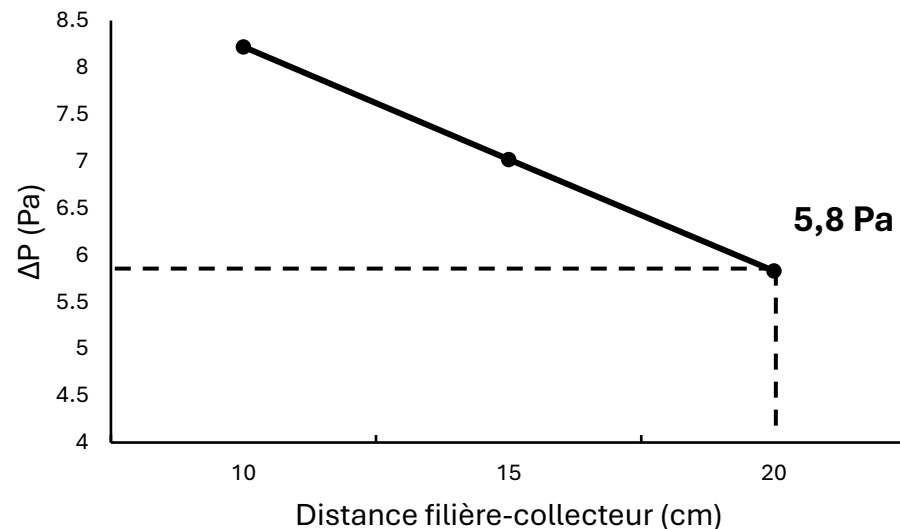


Systeme solvant moins toxique

Résultats performance de filtration

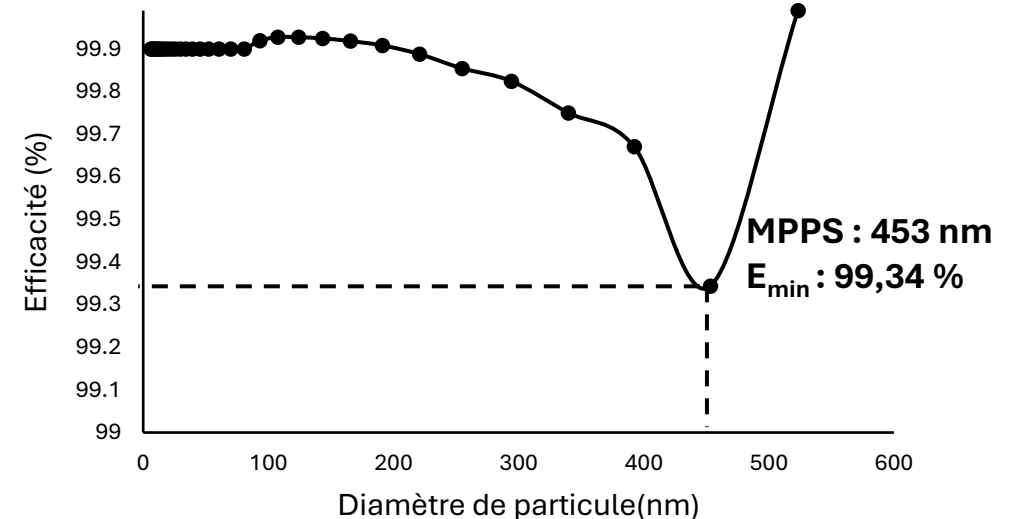
Perte de charge (MRS – ANOVA)

- Seulement **la distance filière-collecteur** affecte la perte en charge
- Minimum $\Delta P = 5,8$ Pa à 20 cm



Efficacité de filtration

- 35 kV | 0,5 mL/h | 20 cm
- MPPS : 453 nm
- E_{\min} : 99,34 %



Conclusion

✓ Le système de solvant moins toxique validé



Systeme	MPPS (nm)	E_{\min} (%)	ΔP (Pa)
Référence	390	96 %	12,5
Moins toxique	453	<u>99,3 %</u>	<u>5,8</u>



Limites et perspectives

Limites

- Système moins toxique: plus de temps
- Problématique de sécurité des solvants

Perspectives

- Alternatives plus sûres et moins toxiques
- Modélisation prédictive des performances
- Intégration dans les EPI ou les filtres industriels



Merci pour votre attention

Question?

Contact : adnan.masri@umontreal.ca