

DermaCube

Plateforme intelligente de maintien de l'interface Air-Liquide (ALI)
pour la culture de peau in vitro

Dossier Technique du Proof of Concept (PoC)

Janvier 2026

Résumé

Ce document présente les spécifications techniques et le modèle mathématique du prototype DermaCube. Ce système automatisé résout le problème critique de la stabilité de l'Interface Air-Liquide (ALI) nécessaire à la différenciation de l'épiderme. En combinant une microfluidique de précision et une régulation algorithmique (PID), DermaCube maintient l'homéostasie du milieu de culture face aux variations environnementales (évaporation, température), là où les méthodes manuelles échouent.

Table des matières

1 Problématique : Le Défi de l'Interface Air-Liquide (ALI)	1
2 Solution Technique : Approche Micro-Environnementale	1
2.1 Distinction Macro vs Micro	2
2.2 Architecture du Système	2
3 Modélisation Mathématique de la Simulation	2
3.1 Équation Différentielle Principale	2
3.2 Modèle d'Évaporation Dynamique	2
3.3 Algorithme de Contrôle (PID)	2
4 Scénarios de Simulation et Résultats	3
4.1 Gestion des Incidents (Fonction Sentinelle)	3
5 Conclusion et Perspectives	3

1 Problématique : Le Défi de l'Interface Air-Liquide (ALI)

La culture de peau reconstruite nécessite une configuration spécifique où les cellules (kératinocytes) sont exposées à l'air sur leur face supérieure tout en étant nourries par le bas.

- **Trop de liquide** : Les cellules sont immergées, pas de différenciation (pas de couche cornée).
- **Pas assez de liquide** : Les cellules meurent de faim ou de déshydratation.
- **Le facteur perturbateur** : L'évaporation naturelle dans l'incubateur (37°C) est instable et dépend de l'humidité ambiante.

2 Solution Technique : Approche Micro-Environnementale

DermaCube se positionne comme un système complémentaire aux incubateurs standards.

2.1 Distinction Macro vs Micro

- **L'Incubateur (Gestion Macro)** : Régule l'ambiance globale de la chambre (Température 37°C, CO₂ 5%).
- **DermaCube (Gestion Micro)** : Régule localement le volume de milieu dans chaque puits, paramètre que l'incubateur ne peut pas contrôler.

2.2 Architecture du Système

Le système fonctionne en boucle fermée de régulation mais en boucle ouverte fluidique :

1. **Capteurs (Monitoring)** : Mesure du niveau de liquide (V), ainsi que T° , pH et Humidité pour l'analyse prédictive.
2. **Contrôleur (Cerveau)** : Algorithme PID calculant le déficit de volume.
3. **Actionneur (Pompe)** : Pompe péristaltique de précision ($\mu\text{L}/\text{min}$).
4. **Injection** : Apport de milieu frais par le bas du puits (pour éviter de noyer l'interface).

3 Modélisation Mathématique de la Simulation

Le cœur du PoC repose sur une simulation physique rigoureuse du bilan de masse dans le puits de culture.

3.1 Équation Différentielle Principale

La variation du volume de milieu $V(t)$ est régie par :

$$\frac{dV}{dt} = Q_{pompe}(t) - Q_{evap}(T, H) - Q_{conso}(N_{cell}) \quad (1)$$

Où :

- Q_{pompe} : Débit d'injection contrôlé (mL/h).
- Q_{evap} : Taux d'évaporation naturelle.
- Q_{conso} : Consommation métabolique des cellules ($\approx 0.006 \text{ mL/h}$).

3.2 Modèle d'Évaporation Dynamique

L'évaporation n'est pas constante, elle dépend des conditions environnementales :

$$Q_{evap} = k_{base} \times (1 + \alpha(T - T_{opt})) \times \max\left(0.5, \frac{100 - H}{100 - H_{opt}}\right) \quad (2)$$

Cette formule modélise que l'évaporation s'accélère drastiquement si l'humidité (H) chute ou si la température (T) augmente.

3.3 Algorithme de Contrôle (PID)

Le débit de la pompe est calculé pour minimiser l'erreur $e(t) = V_{cible} - V_{mesure}$:

$$Q_{pompe}(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (3)$$

Paramètres utilisés dans la simulation :

- Gain Proportionnel ($K_p = 0.5$) : Réaction immédiate à l'écart.
- Gain Intégral ($K_i = 0.1$) : Correction des erreurs statiques (ex : évaporation constante).
- Saturation : $Q_{pompe} \in [0, 0.1] \text{ mL/min}$ (limites physiques de la pompe).

4 Scénarios de Simulation et Résultats

Le PoC compare deux approches sur une durée de 72 heures.

Paramètre	Sans DermaCube (Manuel)	Avec DermaCube (Automatisé)
Fréquence d'ajout	Toutes les 12 heures	Continu (Temps réel)
Précision	$\pm 20\%$ (Erreur humaine)	$\pm 0.1 \text{ mL}$ (Asservi)
Stabilité du niveau	"Dents de scie" (Stress osmotique)	Ligne stable (Homéostasie)
Résilience incidents	Nulle (Échec si chute humidité)	Haute (Compensation active)

TABLE 1 – Comparaison des performances simulées

4.1 Gestion des Incidents (Fonction Sentinelle)

Bien que DermaCube ne régule pas la température, il l'utilise pour son analyse de risque ("IA Prédictive").

- **Cas "Évaporation Accélérée"** : Si $H < 70\%$, le système détecte la perte de masse rapide et augmente l'injection avant que le niveau critique ne soit atteint.
- **Cas "Panne Incubateur"** : Si $T < 35^\circ C$, le système alerte l'utilisateur via les logs, agissant comme une sécurité redondante.

5 Conclusion et Perspectives

Ce Proof of Concept démontre la faisabilité d'un système de culture de peau autonome. En déléguant la gestion fine de l'interface liquide à DermaCube, les laboratoires peuvent standardiser leur production, réduire les coûts de main-d'œuvre et sécuriser des échantillons biologiques précieux.

Document généré pour le Hackathon Owl Lifesciences 2026.