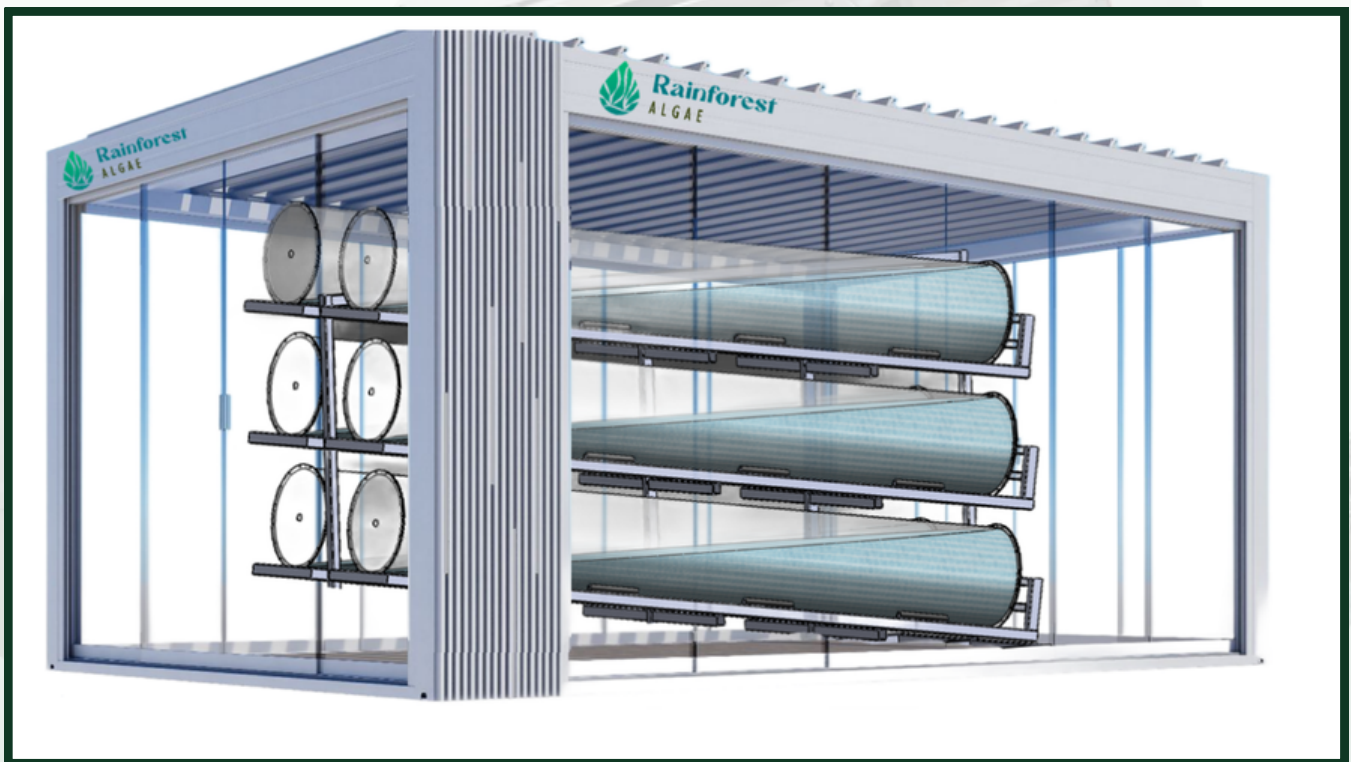




Rainforest
ALGAE

SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES DU PRODUIT





Rainforest
ALGAE

SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES DU PRODUIT

Rainforest Algae Corp. s'efforce de développer le système de bioréacteur le plus performant du marché, en tirant parti des avancées significatives réalisées en matière de mélange des cultures et de transfert de masse des gaz entre les phases liquide et gazeuse. Ces avancées sont essentielles à l'optimisation des rendements réactionnels, y compris les réactions chimiques et photosynthétiques, ainsi que la cinétique des réactions de fermentation. Afin de réduire les coûts opérationnels associés à la culture d'algues, il est possible d'intégrer des sources d'énergie renouvelables. Le soleil nous offre une énergie solaire gratuite qui favorise la croissance des algues. Il est donc primordial, dans la mesure du possible, que les **photobioréacteurs (PBRs)** exploitent cette ressource lorsqu'elle est disponible. C'est dans cette optique que Rainforest préconise l'utilisation d'un système d'enceinte pour les installations commerciales de petite taille et de serres pour les unités de production de plus grande envergure.

Que ce soit pour l'agriculture cellulaire, les algues, les cultures de fermentation, les procédés industriels, l'aquaculture ou le traitement des eaux usées, les systèmes de réacteurs Rainforest sont rapidement adaptables à des volumes de culture allant de 2 L à 100 m³ et potentiellement jusqu'à 1 000 m³. Les programmes de réaction peuvent être définis pour des opérations par lots (batch), semi-continu (semi/fed-batch) ou continu.

CUVES DE RÉACTEURS

Toutes les cuves de réacteur Rainforest Algae sont cylindriques, offrant un rapport surface/volume élevé et favorisant une pénétration uniforme de la lumière à travers la culture. Les cuves des réacteurs sont conçues pour être mises en rotation assurant un flux régulier, laminaire ou légèrement turbulent. Cette configuration vise à réduire les contraintes de cisaillement et prévenir les dommages aux algues ou cyanobactéries sensibles au cisaillement, tout en optimisant les transferts gazeux et le mélange du milieu. Par ailleurs, toutes les cuves sont étanches, garantissant une croissance aseptique et reproductible des cultures.



Les cuves peuvent toutes être **Nettoyées En Place (NEP/CIP)**. Dans le cas des PBRs Minnow et Chinook, les cuves associées sont d'une taille permettant leur stérilisation à l'autoclave. Pour les réacteurs de plus grand volume, le NEP/CIP implique des protocoles garantissant l'asepsie par des cycles de lavage/rinçage/désinfection contrôlés par le système de contrôle et de surveillance (CMS) décrit ci-dessous.

Agents de nettoyage aseptiques recommandés (sans danger)

- Isopropanol (IPA) : Concentration maximale de 30 % pour l'acrylique standard.
- Peroxyde d'hydrogène : Une solution à 3 % est généralement sans danger (par exemple, la marque Lysol).
- Eau de Javel diluée (hypochlorite de sodium) : Un mélange de 1/3 tasse par gallon d'eau (approximativement une dilution d'environ 1:50, soit 0,5 % à 1 % de NaOCl) est généralement sans danger pour la désinfection.
- Savon doux et eau : La méthode la plus sûre pour le nettoyage quotidien.
- Acides : L'acide acétique dilué (5 % à 10 % ; ex. : vinaigre) est généralement sans danger pour éliminer les taches d'eau.

Produits chimiques à proscrire (risque d'endommagement de l'acrylique)

- L'acrylique ne doit JAMAIS être stérilisé à la vapeur (autoclavé) car il se dégrade à des températures supérieures à 50 °C à 80 °C.
- Alcools à forte concentration : > 30 % d'IPA pour l'acrylique non revêtu.
- Nettoyants à base d'ammoniaque (ex. : standard Windex).
- Solvants puissants : acétone, benzène, essence, diluants à laque, tétrachlorure de carbone.
- Nettoyants fortement alcalins : dégraissants puissants (pH 13-14), hydroxyde de sodium concentré.
- Acides forts : acide nitrique fumant, acide chlorhydrique concentré.
- Abrasifs : tampons à récurer ou nettoyants abrasifs.

Considérations clés pour les procédures aseptiques :

- Temps de contact : limiter le temps de contact pour minimiser la dégradation. Rincer à l'eau immédiatement après la désinfection.
- Fissuration sous contrainte environnementale : l'acrylique est susceptible de se fissurer lorsqu'il est exposé à des nettoyants sous contrainte mécanique (ex. : vis trop serrées, plaques pliées).
- Acrylique à revêtement dur : en cas d'utilisation d'alcool à 70 % ou de désinfectants puissants, vérifier si le matériau est muni d'un revêtement dur spécifique conçu pour la résistance chimique.
- Application : toujours tester les nettoyants sur une zone peu visible au préalable.

Procédure de nettoyage :

- Nettoyage : éliminer les matières organiques avec de l'eau et du savon doux.
- Désinfection : Appliquer les agents approuvés (par exemple, à 3 %).
- Rinçage : Rincer abondamment à l'eau osmosée pour éviter l'accumulation de résidus.

Pour les réacteurs Rainforest Algae **Minnow** et **Chinook**, il est possible de choisir entre une **fabrication en plastique PET de qualité alimentaire et en verre borosilicaté**. Le verre borosilicaté offre une transmission lumineuse supérieure, une inertie chimique, ainsi qu'une résistance à la corrosion et aux chocs thermiques, qui supportent l'autoclavage pour la stérilisation et le maintien de conditions aseptiques. Les réacteurs classiques à fond rond favorisent un mélange efficace, réduisent les contraintes de cisaillement et améliorent les échanges gazeux.

Les versions de plus grande capacité et modulables des réacteurs Rainforest Algae utilisent toutes des tubes cylindriques en acrylique résistants aux produits chimiques et aux détergents, dotés de surfaces lisses pour minimiser l'encrassement et l'accumulation de biofilm, et faciliter le nettoyage. Bien que la Brochure Produit des Technologies Rainforest propose des capacités de milieu de culture de volume **420 L, 1250 L** et plus, les clients peuvent en réalité commander les configurations les mieux adaptées à leurs besoins. Sous réserve des contraintes dimensionnelles applicables, les clients peuvent choisir le volume de milieu de culture souhaité et commander leurs réacteurs avec la longueur, le diamètre et le nombre de tubes de réacteurs selon leurs besoins. Ce calcul s'effectue aisément en déterminant le volume d'un réacteur cylindrique donné et en le divisant par deux. La conception du réacteur repose sur le fait que la moitié du volume est occupée par le fluide et que la cuve du réacteur est inclinée pour favoriser un mélange tridimensionnel efficace et optimiser les transferts de masse et de gaz. À mesure que votre production augmente, l'utilisation de plusieurs cuves de réacteurs permet de limiter les risques de perturbations coûteuses des cultures et de reprendre rapidement la pleine production en cas de perte de culture dans un réacteur. De plus, vous pouvez faire fonctionner plusieurs cultures simultanément. Cette configuration facilite également l'empilage vertical.

LE SYSTÈME DE SURVEILLANCE ET DE CONTRÔLE RAINFOREST (RF-CMS)

Le système de surveillance et de contrôle (CMS) est un composant intégral de chaque système de réacteur Rainforest. L'interface utilisateur (IU) du CMS est accessible via les écrans tactiles associés aux différents systèmes de réacteurs. Le réacteur Minnow est le seul à ne pas disposer de son propre écran tactile. Ce dernier doit être commandé séparément et permet de contrôler simultanément jusqu'à 6 réacteurs Minnow. Grâce à sa connectivité Wi-Fi, le CMS est également compatible avec les ordinateurs de bureau et les appareils mobiles. Il est ainsi possible d'y accéder depuis un ordinateur de bureau ou portable, ou encore depuis un smartphone, une tablette ou un iPad.

Tous les capteurs intégrés au CMS sont surveillés en temps réel et les données sont enregistrées. Ces capteurs permettent de contrôler des paramètres système spécifiques selon des plages ou des programmes définis. Le CMS est constamment amélioré afin d'optimiser les rendements et de faire évoluer la technologie vers une plateforme entièrement automatisée. Les cuves des réacteurs peuvent être scellées et nettoyées en place (NEP/CIP) pour garantir des cultures exemptes de contamination. Selon les exigences de la réaction, le système peut être configuré avec des systèmes d'éclairage, de température, d'échange gazeux, d'apport de nutriments, de pompes de récolte, de capteurs de paramètres, etc., tous contrôlables. Le CMS peut être configuré pour répondre aux cinétiques des réactions et/ou aux algorithmes d'IA/ML.

Contrôle de l'intensité lumineuse : L'intensité lumineuse peut être ajustée via le CMS. Les mesures de densité de flux de photons photosynthétiques (PPFD) ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) sont effectuées à la surface interne du photobioréacteur. De même, des cycles jour/nuit automatisés peuvent être programmés via le CMS.

Contrôle du pH. Tous les systèmes de réacteurs Rainforest Algae sont équipés de sondes pH. Le pH peut être surveillé et contrôlé via le CMS. Une fois la consigne et la plage de pH définies, le système ajuste automatiquement la durée et la fréquence des impulsions de CO_2 afin de maintenir la consigne établie. Alternativement, le contrôle du pH peut également être assuré par l'injection de solutions via des pompes péristaltiques.

Contrôle de la température. La température peut être contrôlée par le CMS, et est principalement influencée par l'intensité lumineuse et la température ambiante. Un thermocouple est placé dans le milieu de culture et connecté au CMS. La consigne et la plage de température de fonctionnement sont réglables de 5°C à 40°C . La circulation du liquide chauffé/refroidi dans une « **enveloppe** » PBR est automatiquement contrôlée par le CMS afin de maintenir la température du milieu de culture à la consigne définie par l'opérateur.

MÉLANGE DU MILIEU DE CULTURE

Le milieu de culture est efficacement mélangé par la rotation du tube PBR. La vitesse de rotation du tube PBR peut être réglée et modifiée sur le CMS afin d'augmenter ou de diminuer l'agitation.

AÉRATION

Dans les bioréacteurs Rainforest, bien qu'il soit possible d'assurer la diffusion/dispersion des gaz par bulles, cela n'est généralement pas nécessaire. Les gaz sont injectés dans l'espace de tête du réacteur tubulaire. L'échange gazeux optimal est assuré par le mélange efficace du milieu et le renouvellement rapide de la surface mouillée du tube générée par la rotation du tube. Le taux d'échange gazeux dépend de la température, de la pression dans le réacteur, des pressions partielles des gaz dans les bulles et le milieu, du mélange du milieu et de la surface des bulles. Chacun de ces paramètres est contrôlable via le CMS.



Ce tube en rotation, grâce au mélange efficace du milieu, réduit également le risque d'encrassement à l'intérieur du réacteur et limite significativement la formation de mousse.

Dans les systèmes de réacteurs conventionnels, l'aération, mécanisme de transfert des gaz d'une phase gazeuse vers un milieu liquide, est réalisée par la dispersion et la libération de fines bulles de gaz depuis le fond de la cuve. Ces bulles remontent dans le milieu, provoquant des échanges gazeux entre les gaz dissous dans le liquide et les gaz qu'elles contiennent. Leur remontée contribue également au mélange du milieu de culture. La formation de mousse dans les cultures est principalement due à la dispersion importante des bulles dans la colonne des réacteurs. Dans les réacteurs Rainforest Algae, la formation de mousse est considérablement réduite par rapport aux autres systèmes de réacteurs conventionnels.

CONTRÔLE DE LA MOUSSE

La conception des réacteurs Rainforest Algae réduit le besoin de contrôle de la mousse. Les problèmes opérationnels liés à la formation de mousse, tels que le colmatage des filtres, la contamination, la réduction du volume utile et la diminution des taux de transfert de gaz, sont considérablement réduites avec les réacteurs Rainforest Algae. Ceci est dû à l'absence d'aération par diffusion (bullage de gaz dans le milieu) et de mécanismes d'agitation mécanique, ainsi qu'à la conception du système de réacteur rotatif qui minimise les forces de cisaillement susceptibles d'entraîner la formation de mousse. Toutefois, en cas de formation de mousse, souvent associée aux tensioactifs et aux protéines libérés par les organismes, l'ajout d'agents antimousse standard peut être effectué à l'aide de pompes péristaltiques.

NANOBULLES (NB)

L'apport de **nanobulles (NB)** constitue une étape supplémentaire permettant d'assurer un échange gazeux encore plus rapide. Le transfert de masse des gaz dans de nombreuses réactions demeure un facteur limitant majeur de la cinétique réactionnelle et de la capacité à obtenir des rendements plus élevés en produits désirés.

Les nanobulles sont des bulles d'un diamètre de 10^{-9} m. Il s'agit de bulles invisibles à l'œil nu car leur diamètre est inférieur à la longueur d'onde de la lumière. Elles sont donc indétectables, même au microscope optique. Leur particularité réside dans leur métastabilité. Elles ont tendance à ne pas fusionner ni à s'associer à d'autres bulles et, de ce fait, leur flottabilité est neutre, leur permettant de ne pas remonter pas à la surface du milieu de culture. Elles peuvent ainsi jouer le rôle d'« éponge » pour le transfert et l'échange de gaz. On peut obtenir des concentrations de 10^6 à 10^8 , voire 10^9 NB/ml en solution, grâce à des générateurs de nanobulles. L'addition de ces millions de nanobulles représente une surface totale assez élevée favorisant un transfert de gaz beaucoup plus important, tout en saturant le milieu en gaz.

Rainforest Algae a développé des générateurs de nanobulles permettant d'atteindre des concentrations extrêmement élevées, favorisant ainsi des vitesses de réaction plus rapides et des échanges gazeux plus efficaces au sein du milieu. Contactez-nous pour toute information concernant les générateurs NB stationnaires ou à flux continu.

FONCTIONNEMENT DE LA CULTURE (BATCH, FED-BATCH, CONTINU)

Le système de bioréacteur Rainforest Algae peut être configuré par l'opérateur du PBR pour gérer la culture en mode « batch », le milieu de culture étant préalablement mélangé avec tous les nutriments nécessaires à la croissance des algues pendant toute la durée du cycle.

Le bioréacteur peut également être configuré pour une culture en mode « Fed-Batch », une stratégie de bioréacteur semi-ouvert où les nutriments sont apportés en continu ou par intermittence à un lot de cultures, évitant ainsi leur épuisement et prolongeant la phase de croissance exponentielle. Cette technique maximise la densité cellulaire et le rendement en produits (protéines, antibiotiques, etc.) tout en contrôlant les taux de croissance et en minimisant l'accumulation de métabolites toxiques. Ceci est rendu possible grâce au CMS qui contrôle les pompes péristaltiques alimentant la culture en nutriments.

ALIMENTATION EN GAZ DES RÉACTEURS

Chaque réacteur est équipé d'un **système de pompage d'air** aspirant l'air à travers un filtre de 0,2 µm. Le réglage du système de pompage est adapté à la taille du réacteur et aux exigences de débit et/ou de pression de gaz.

Pour chaque cuve de réacteur, un **débitmètre manuel d'air/CO₂ (rotamètre)** peut être configuré de 0,1 L/min à 30 L/min, voire plus, selon le volume de culture. En cas d'alimentation en gaz à partir de réservoirs sous pression, la pression du gaz primaire est régulée au niveau du réservoir à la pression de ligne souhaitée (fournie par un tiers). Un débitmètre contrôle le flux de gaz entrant dans la cuve du réacteur.

Pour automatiser le contrôle d'un flux d'air comprimé contenant du CO₂, une électrovanne s'ouvre et se ferme selon les paramètres programmés dans le CMS par l'opérateur du réacteur, afin d'injecter du CO₂ dans le réacteur par impulsions et ainsi réguler le pH.

Une électrovanne à débit de gaz réglable, commandée par le CMS, est également disponible pour des applications spécifiques.

Système de contrôle de la pression d'air (APCS) : Des pompes à air (RF-AP), associées aux réglages du débitmètre et à un manomètre analogique (RF-APG) connecté au CMS, permettent la commande automatisée de la vanne de gaz réglable (RF-GVS-Adj) afin de maintenir une pression constante dans la cuve du réacteur.

ATTENTION : * *La pression dans la cuve du réacteur, dans la configuration d'assemblage standard Rainforest Algae, ne doit PAS DÉPASSER 0,1 MPa (14 psi, 1 bar).*

ALIMENTATION/TRANSFERT DE LIQUIDES POUR LES CUVES DU RÉACTEUR

Les pompes péristaltiques et les vannes de régulation peuvent être pilotées par le CMS pour assurer des débits et des volumes de liquides réglables à des intervalles prédéfinis, avec la possibilité d'alimenter et de récupérer simultanément les liquides. Sur demande, des débitmètres peuvent être intégrés pour une plus grande précision des fluides transférés.

TROUSSE D'OUTILLAGE D'INSTALLATION

L'outillage manuel nécessaire à l'installation et à l'exploitation quotidienne du système PBR sera fourni, ainsi qu'un ensemble de pièces de rechange pour les principaux composants.

EXIGENCES EN MATIÈRE D'ALIMENTATION : **IMPORTANT : Les Beluga 1250L PBR nécessitent une connexion de 240 V / 50 A ou jusqu'à 8 circuits de 110-120 V / 15 A.

EXEMPLES DE CONTRÔLES RAINFOREST

- Programmer les cycles jour/nuit
- Contrôler l'éclairage
 - Intensité
 - Clignotement (programmation marche/arrêt)
 - Intensité en fonction de la densité de culture (algues)
- Contrôler la température de culture
 - Ventilateurs
 - Système de refroidissement
 - Éclairage et intensité lumineuse / lumière pulsée
- Contrôler le mélange - modifier la vitesse de rotation du réacteur
- Contrôler la formation de mousse - modifier la vitesse de rotation du réacteur / injecter un agent antimousse
- Contrôler la pression de la cuve du réacteur