



"Ce projet a été financé dans le cadre du programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne, au titre de la convention de subvention n° 101000801."



Les fluides thermo-chimiques dans l'agriculture d'intérieur

MANUEL DE FORMATION

COORDINATEUR



Zurich University
of Applied Sciences



School of
Engineering

IEFE Institute of Energy Systems
and Fluid Engineering



MEYER
ORCHIDEEN



IZNAB Sp. z o.o.
"Innovation Oriented To Business"



Leibniz
Universität
Hannover



UNIVERSIDAD
DE ALMERÍA



DÉCLARATION DE RENONCIATION

La diffusion des résultats doit indiquer qu'elle ne reflète que l'opinion de l'auteur et que l'Agence et la Commission européenne ne sont pas responsables de l'utilisation des informations qu'ils contiennent.

Contenu

1. Introduction	4
1.1. Consortium	4
1.2. Aperçu du projet	4
1.3. Concept	5
1.4. Application pour les serres	6
1.5. Application pour le processus de séchage dans la préparation des aliments	7
1.6. Régénération du TCF	7
1.7. Liquides utilisés dans TheGreefa	8
2. Démonstration des technologies TheGreefa	9
2.1. Démonstrateur en Suisse	13
2.2. Démonstrateur en Tunisie	21
3. Simulations et optimisation - études de cas	30
3.1. Études de cas	30
3.2. Étude de cas 1 – Serre non chauffée de type Almería	35
3.3. Étude de cas 2 – Serres multichapelles non chauffées en Espagne	37
3.4. Étude de cas 3 – Serres chauffées multichapelles en Espagne	39
3.5. Étude de cas 4 – Serre multichapelles non chauffée en Italie	40
3.6. Étude de cas 5 – Serres chauffées high-tech à plusieurs travées en Italie	42
3.7. Conclusions	44
4. TheGreefa – Impact sur l'environnement et l'économie	45
4.1. Impact sur l'environnement	45
4.2. Importance économique	55
4.3. Conclusions	59
5. Aspects sociaux et politiques	61
5.1. Cadre stratégique européen pour l'agriculture	61
5.2. Cadre juridique européen dans le domaine de l'énergie	62
5.3. Cadre juridique européen pour l'eau	62
5.4. Cadre réglementaire européen pour les produits chimiques	63
5.5. Conclusions	63
Références	65
Partenaires TheGreefa et autres parties prenantes	66

1. Introduction

Ce document présente la structure et les résultats du projet Thermochemical Fluids in Greenhouse Farming "TheGreefa" (Horizon 2020 R&I Programme, Call LC-FNR-06-2020, Grant Agreement no. 101000801) et donne un aperçu des principales phases et résultats.

1.1. Consortium

TheGreefa est un projet de recherche et d'innovation financé par la Commission européenne et réalisé par 12 partenaires de 7 pays (Figure 1). Le consortium, une équipe composée d'instituts de recherche, de PME, d'exploitations agricoles et d'experts juridiques, a été formé afin d'assurer un équilibre entre les compétences et l'expertise pour le développement d'une technologie rentable et innovante qui réduira considérablement l'utilisation d'énergie fossile dans l'agriculture.

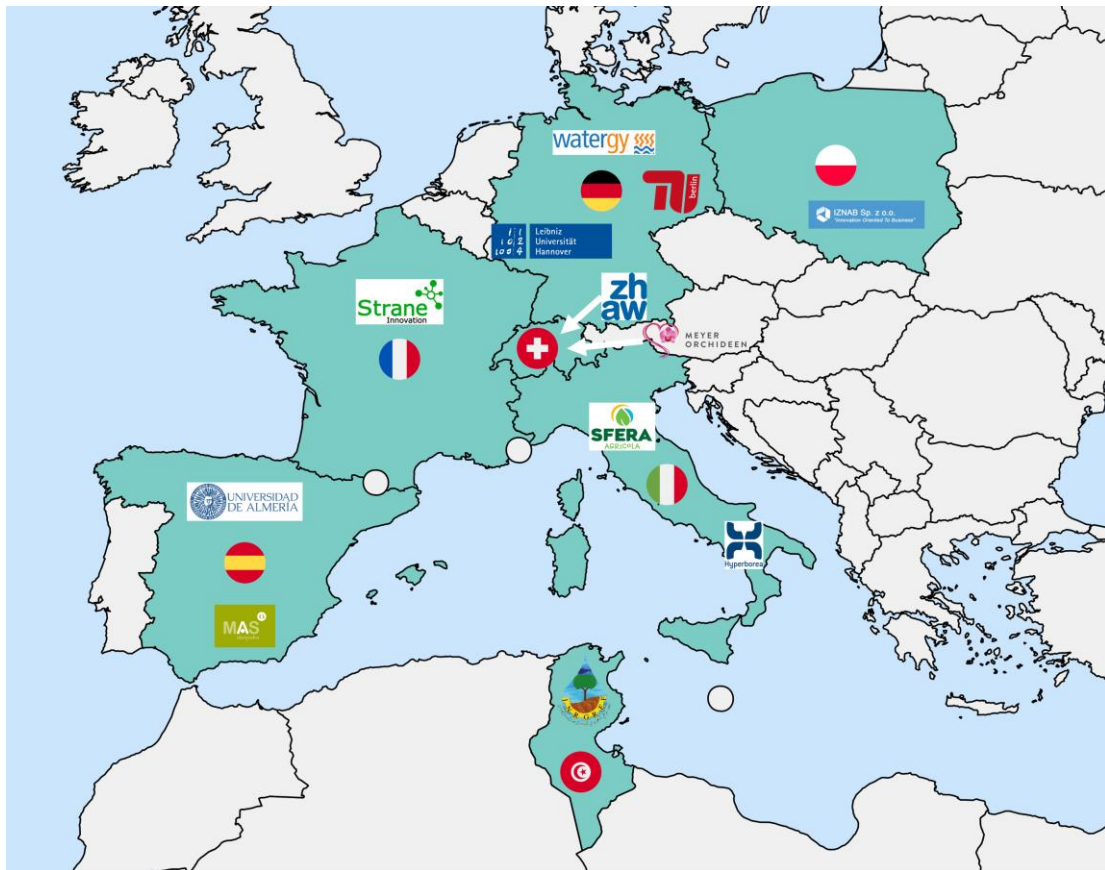


Figure 1. Partenaires du consortium TheGreefa.

1.2. Aperçu du projet

L'objectif du projet est de développer et de tester une technologie innovante et peu coûteuse qui réduira considérablement l'utilisation d'énergie fossile dans l'agriculture.

Les solutions proposées par TheGreefa s'inscrivent directement dans les principaux objectifs de l'UE visant à augmenter l'utilisation des énergies renouvelables dans l'agriculture, les serres étant de plus en plus importantes. Dans les pays développés, une qualité de vie élevée concerne avant tout l'alimentation, qui doit être fraîche, saine et variée. De longues distances de transport sont souvent nécessaires, car le transport de fruits et légumes frais génère une forte émission de CO₂ et une empreinte écologique considérable des aliments. Les régions à faible revenu où les conditions ne sont pas favorables aux cultures intensives ne peuvent pas se permettre d'importer des denrées alimentaires.

Dans les deux cas, les serres avec climatisation durable, contrôle de l'humidité, récupération de l'eau et séchage des aliments constituent la bonne solution, conformément aux exigences de TheGreefa.

1.3. Concept

TheGreefa se concentre sur les applications pour les serres et les processus de séchage. La technologie des serres comprend des applications pour la climatisation des serres, y compris le chauffage, le refroidissement et le contrôle de l'humidité. La technologie proposée utilise des déshydratants liquides appelés "fluides thermo-chimiques" (TCF). Les TCF typiques sont des solutions salines à base d'hydroxyde de sodium ou de chlorure de magnésium. L'effet commun à toutes les applications est la propriété hygroscopique du TCF, qui permet l'absorption de la vapeur d'eau de l'air et libère donc également de la chaleur sensible, convertie à partir de la chaleur latente stockée dans la vapeur. Pour donner une approximation du processus

- 1 tonne d'humidité absorbée par le TCF, correspondant à l'énergie du changement de phase, libère 680 kWh de chaleur (partie droite de la Figure 2). L'humidité est ensuite condensée en eau liquide.
- L'absorption d'eau dilue le TCF. Lorsque le TCF est dilué jusqu'à un certain point, le processus ne peut pas se poursuivre et le TCF doit être régénéré. L'eau absorbée doit être expulsée.
- Pour la re-concentration (régénération), la même quantité d'énergie libérée par le processus d'absorption doit être réinjectée dans le système, à nouveau environ 680 kWh par tonne d'eau évaporée. Des températures inférieures à 60 °C de la source de chaleur sont largement suffisantes pour le processus de régénération, la température exacte dépendant de l'équilibre des phases de la vapeur sous pression entre le TCF et l'air ambiant.

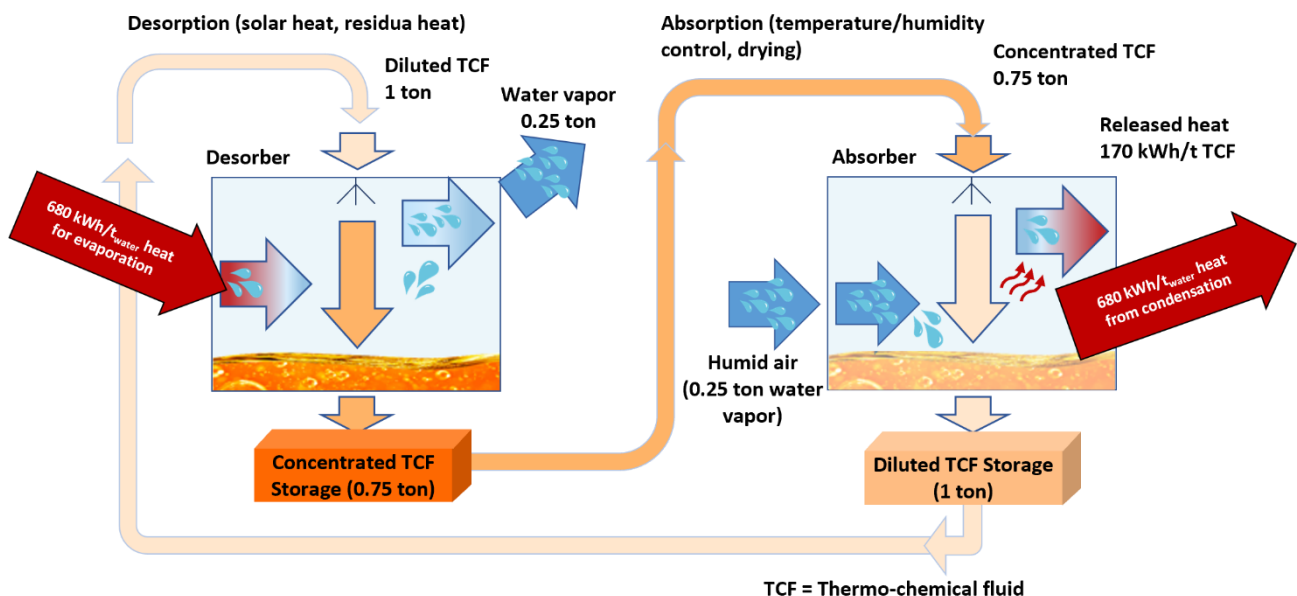


Figure 2. Concept de TheGreefa.

L'eau peut être libérée sous forme de vapeur d'eau absorbée par l'air sec (partie gauche de la Figure 2) ou condensée et peut être récupérée sous forme d'eau pure.

Le TCF dilué peut être régénéré et stocké pendant les périodes où la chaleur est disponible, par exemple les jours ensoleillés grâce à l'énergie solaire ou à la chaleur résiduelle. Le TCF concentré peut être stocké dans de simples récipients en plastique (par exemple, des réservoirs IBC pour les petites applications)

aussi longtemps que nécessaire, par exemple comme stockage saisonnier. Le décalage dans le temps et dans l'espace entre le processus de régénération et l'utilisation effective du TCF est le grand avantage de cette solution innovante par rapport aux procédés de sorption existants basés sur des matières solides, comme ceux utilisés dans les roues rotatives de sorption.

En mode régénération, le procédé peut être utilisé avec un système d'humidification et d'évaporation.

L'effet de refroidissement peut être utilisé en tant que puissance supplémentaire.

1.4. Application pour les serres

Le chauffage des serres est le facteur de coût le plus important pour l'activité de serre en Europe centrale. TheGreefa peut être utilisé avec succès dans ces régions, ce qui permet de réduire considérablement l'énergie primaire nécessaire au chauffage.

Cette application est expliquée dans la Figure 3 ci-dessous, où les flux d'énergie et d'eau d'une serre standard (à gauche) sont comparés à ceux d'une serre dans laquelle la technologie proposée est installée (à droite).

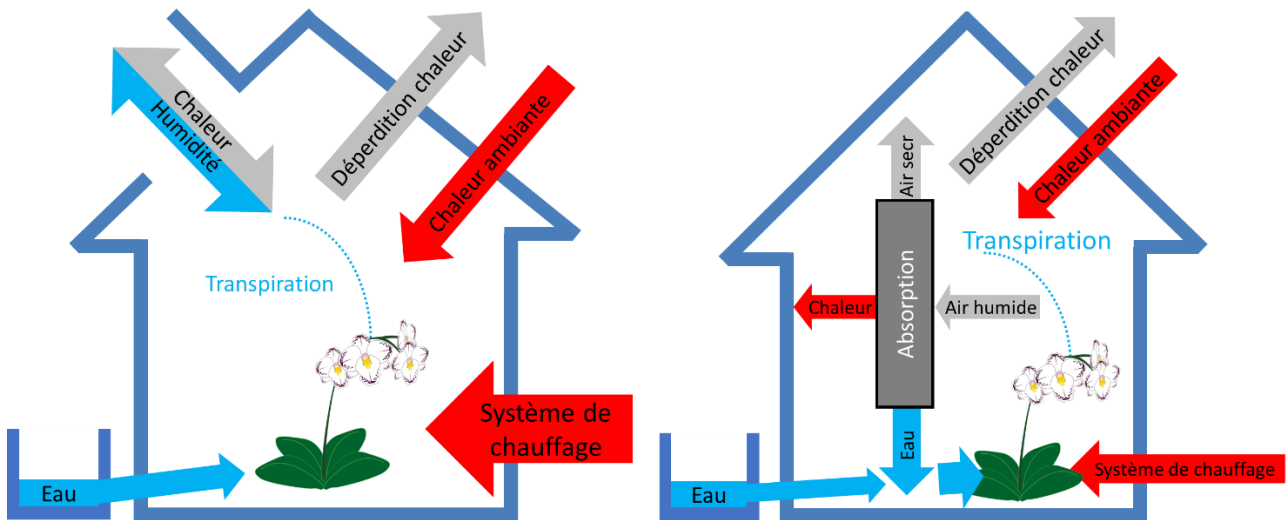


Figure 3. Application des technologies dans les serres - serre standard (à gauche) et technologie proposée (à droite).

La consommation totale d'énergie (flèches rouges) est fortement réduite : D'une part, la perte de chaleur pour la ventilation est quasiment nulle, car l'air est brassé et l'humidité est évacuée par le TCF. D'autre part, le processus d'absorption libère de la chaleur.

La technologie consiste en un échangeur de chaleur et de masse (absorbeur) ouvert à contre-courant, qui déshumidifie et réchauffe l'air par absorption en utilisant le TCF, ou l'évacue pour le refroidir. L'eau absorbée peut être récupérée sous forme d'eau pure.

La chaleur thermique peut être stockée de manière saisonnière sous forme de TCF concentré. Il trouve une récupération décalée dans le temps et dans l'espace de la chaleur thermique à lieu.

1.5. Application pour le processus de séchage dans la préparation des aliments

Le procédé convient également très bien pour le séchage de produits agricoles tels que les herbes et les fruits qui, indépendamment des conditions météorologiques, doivent être séchés immédiatement après la récolte.

Cette application est expliquée dans la Figure 4. L'air est séché dans un absorbeur à contre-courant avec un TCF concentré, mais pas nécessairement chauffé, car la chaleur pourrait endommager les feuilles/légumes et affecter leur qualité. Dans un circuit fermé, l'air sec libéré est ensuite dirigé vers la chambre de séchage, où l'humidité des légumes peut être absorbée. Le TCF dilué peut ensuite être stocké et régénéré sans perte de chaleur, lorsque de la chaleur renouvelable (par exemple solaire) est disponible. Par rapport aux installations modernes utilisant des déshumidificateurs à compression, la consommation d'énergie électrique d'un séchoir à sorption se limite au fonctionnement des ventilateurs et des pompes à liquide, tandis que l'énergie thermique nécessaire peut être entièrement fournie par une source de chaleur à basse température, qui peut par exemple être renouvelable (chaleur solaire, chaleur résiduelle). Après le processus de régénération, l'énergie fournie peut également être stockée sans perte sous forme de TCF concentré.

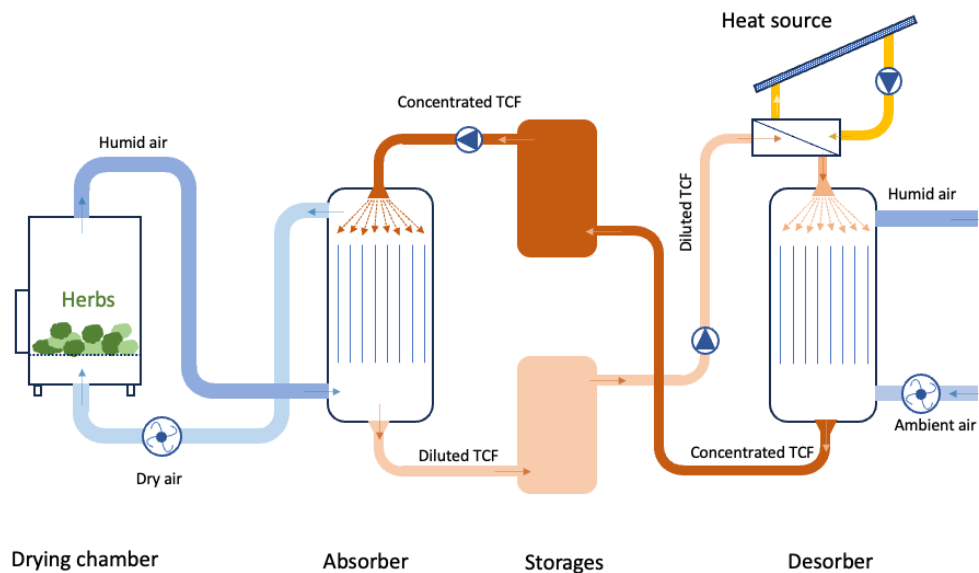


Figure 4. Processus de séchage avec l'absorbeur et le désorbeur.

1.6. Régénération du TCF

Après l'absorption, le fluide thermochimique a atteint le point de saturation et n'est alors plus utilisable pour le séchage/la déshumidification. Le TCF doit être régénéré pour libérer l'eau absorbée. La régénération est le processus opposé à l'absorption. Le TCF est mis en contact avec de l'air sec et des parties de l'eau de la solution TCF s'évaporent dans l'air qui circule dans l'appareil. Pour forcer le processus, une température basse est généralement suffisante pour augmenter la température de l'air et ainsi réduire l'humidité relative. Le niveau de température dépend de l'équilibre de la pression de vapeur entre l'air et le TCF, mais dans tous les cas, il est inférieur à 60 °C. En hiver, la température est nettement inférieure en raison de la faible teneur en eau de l'air extérieur. Pendant ce processus, la "chaleur" est stockée dans le TCF sous forme de potentiel thermochimique (TCF concentré).

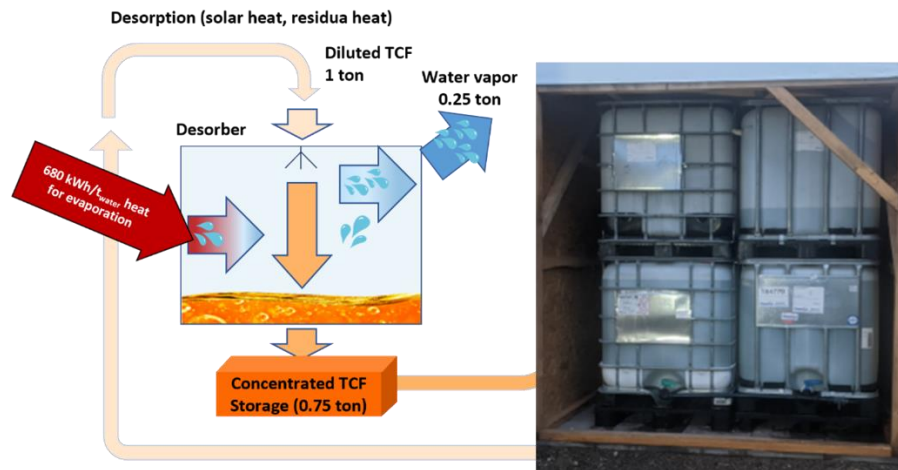


Figure 5. Régénération du TCF.

L'absorption et la désorption peuvent avoir lieu dans la même colonne d'absorption (appelée "absorbeur" en abrégé) à des périodes différentes. L'équilibre de la pression de vapeur entre l'air et le TCF détermine la direction dans laquelle l'eau/l'humidité migre, c'est-à-dire vers le liquide ou hors du liquide.

1.7. Liquides utilisés dans TheGreefa

Les fluides thermochimiques utilisés dans ce projet sont le MgCl_2 et le NaOH .

Le MgCl_2 n'est pas très souvent utilisé dans les processus de séchage, car sa propriété hygroscopique est beaucoup plus faible que celle du LiBr ou du LiCl . Les solutions de MgCl_2 peuvent réduire l'humidité relative à 30 % à température ambiante (20 °C), mais pas en dessous. Cependant, l'humidité requise pour une utilisation en serre est de l'ordre de 40 à 70%, ce qui signifie que l'hygroscopicité du MgCl_2 est suffisante.

L'avantage du MgCl_2 est sa grande disponibilité, puisqu'il fait partie de l'eau de mer avec une concentration dans l'eau de mer de 1 kg/m^3 , et son coût très faible d'environ 100 €/m^3 .

Le NaOH est utilisé pour le séchage. Le MgCl_2 ne convient pas ici en raison de sa faible hygroscopicité. Pour le séchage de la biomasse, l'humidité de l'air à la sortie de l'absorbeur doit être réduite à environ 10 %. Cela est possible avec du NaOH , dont la disponibilité est également élevée et le coût suffisamment bas. Une limite à l'utilisation du NaOH est sa réaction avec le CO_2 contenu dans l'air. Cette réaction n'a pas d'influence significative sur le processus de séchage, car l'air est brassé dans une chambre de séchage à absorption fermée et ne retient donc qu'une très petite quantité de CO_2 à la fois.

Ces deux liquides thermochimiques sont inoffensifs : le MgCl_2 est un sous-produit de l'extraction du sel de cuisine, tandis que le NaOH est utilisé comme ingrédient dans la préparation des aliments.

2. Démonstration des technologies TheGreefa

Comme nous l'avons présenté dans la section 1.3, TheGreefa utilise des déshydratants liquides, appelés fluides thermochimiques (TCF). Les TCF typiques sont des solutions salines à base d'hydroxyde de sodium ou de chlorure de magnésium. L'effet commun à toutes les applications est la propriété hygroscopique du TCF, qui permet l'absorption de la vapeur d'eau de l'air et libère donc également de la chaleur sensible, qui est convertie à partir de la chaleur latente stockée dans la vapeur. Pour donner une approximation du processus

- 1 tonne d'humidité absorbée dans la serre libère 680 kWh de chaleur lors du changement de phase. L'humidité (vapeur) se transforme en eau liquide. L'effet est que la serre est à la fois chauffée et déshumidifiée.
- L'absorption d'eau dilue le TCF. Lorsque le TCF est dilué jusqu'à un certain point, le processus ne peut pas se poursuivre et le TCF doit être régénéré. L'eau absorbée doit être expulsée.
- Le TCF dilué peut être stocké pendant une longue période sans pertes, le TCF dilué est régénéré lorsque la chaleur est disponible.
- Lorsque la chaleur est disponible, par exemple les jours ensoleillés ou lorsque de la chaleur résiduelle est disponible, le TCF dilué est transporté vers la régénération, qui peut se trouver au même endroit dans la serre ou ailleurs (partie gauche de la Figure 6 ci-dessous), car il n'y a pas de pertes pendant le transport. Il n'y a pas de stockage d'énergie thermique, mais un potentiel de libération d'énergie thermique.
- Pour la re-concentration (régénération), la même quantité d'énergie libérée par le processus d'absorption doit être réintroduite dans le système, à nouveau environ 680 kWh/tonne d'eau évaporée. Des températures inférieures à 60 °C de la source de chaleur sont largement suffisantes pour le processus de régénération, la température exacte dépendant de l'équilibre des phases de la vapeur sous pression entre le TCF et l'air ambiant.
- L'eau peut être libérée sous forme de vapeur d'eau, absorbée par l'air sec, ou condensée et récupérée sous forme d'eau pure (partie centrale de la Figure 6).
- Le TCF concentré peut être stocké aussi longtemps que nécessaire, et même au-delà de la date de péremption, après une longue période.

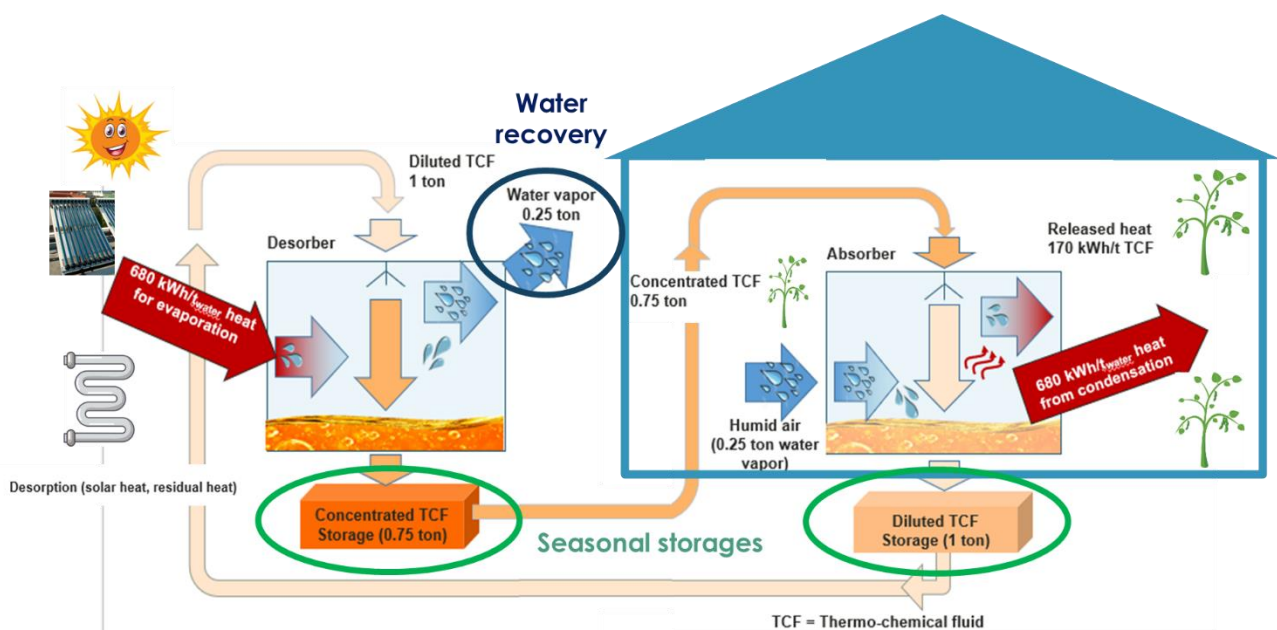


Figure 6. Boucle de TCF pour les serres.

TheGreefa est utilisé dans les régions au climat continental pour réguler la température et l'humidité dans les serres. L'utilisation de TheGreefa permet de réduire la consommation d'énergie pour le chauffage, ce qui a un impact considérable sur le bilan global dans ces régions. Grâce au contrôle interne de l'humidité, il n'est plus nécessaire de renouveler l'air avec de l'air extérieur plus sec et plus froid. Par conséquent, les pertes de chaleur vers l'extérieur sont réduites. De plus, le processus d'absorption libère davantage de chaleur, ce qui réduit encore la demande d'énergie pour le chauffage. La Figure 7 montre une serre traditionnelle sur la gauche et la serre TheGreefa sur la droite. Le processus de régénération a lieu à l'extérieur de la serre, et l'air humide est ensuite rejeté dans l'atmosphère. En milieu continental, il n'est pas nécessaire de récupérer l'eau.

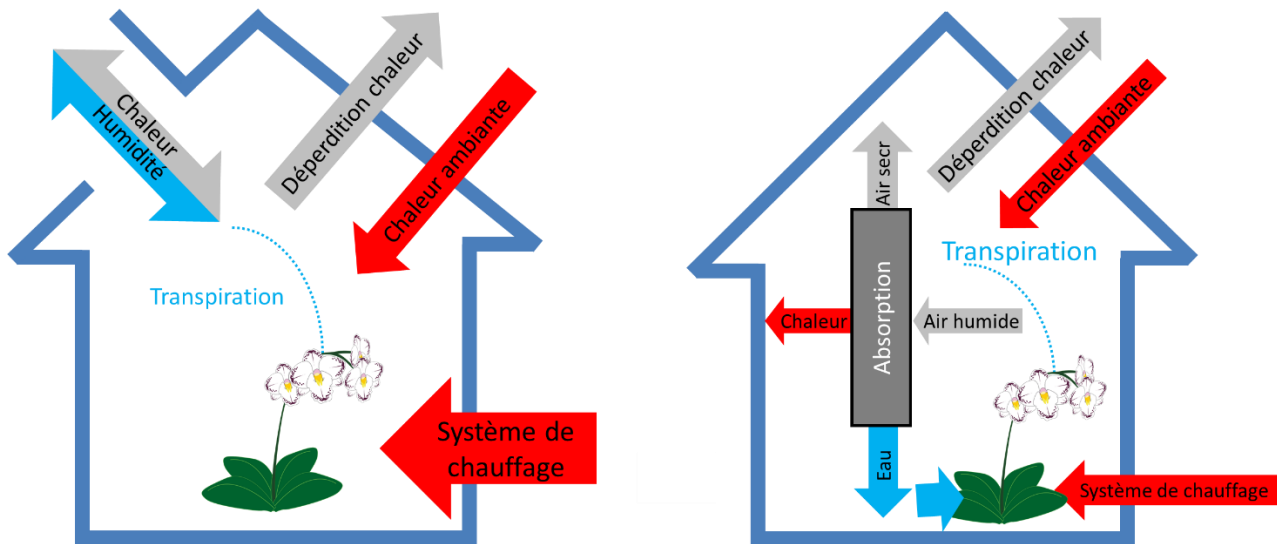


Figure 7. Application TheGreefa comparée à une serre standard.

Absorbeur

L'absorbeur est un composant très simple. Il s'agit d'un laveur d'air en plastique équipé de surfaces de ruissellement. Le plastique est nécessaire en raison du haut degré de corrosion du TCF (solution saline).

L'air circule de bas en haut, le TCF de haut en bas. La garniture augmente la surface de contact et le temps de contact entre l'air et le TCF.

Pour garantir un haut degré d'absorption, un temps de séjour minimal des deux liquides dans l'absorbeur est nécessaire. Pour ce faire, il faut définir une vitesse d'air suffisante et une densité de flux TCF minimale.



Figure 8. Corp de garniture de différentes tailles.

Dans le démonstrateur suisse, le temps de séjour est de 1,5 seconde et deux valeurs sont fixées : 1 m/s pour la vitesse de l'air (absorbeur vide) et $12 \text{ m}^3 / (\text{h m}^2)$ pour la densité du flux de TCF.

Ce paramètre de dimensionnement donne un diamètre de 0,4 m et une hauteur active de 1,3 m. La hauteur active est la partie de l'absorbeur où il y a un contact entre l'air et le TCF.

Le montage simple est illustré à la Figure 9: A gauche, un prototype transparent est utilisé dans l'installation de la ZHAW. La partie "blanche" est remplie par le pack et constitue la hauteur active. A droite, on peut voir l'absorbeur installé dans le démonstrateur suisse.



Figure 9. Absorbeur transparent dans le laboratoire de la ZHAW (à gauche) et absorbeur installé dans le démonstrateur suisse (à droite).

Absorbeur : Composants

L'absorbeur se compose de différentes parties, indiquées par des couleurs différentes dans la Figure 10 :

- Jaune : le distributeur de TCF assure que le TCF est distribué de manière homogène dans toute la section de l'absorbeur.
- Bleu : partie active / corps de remplissage : cette partie est remplie de petits corps de remplissage. C'est ici que le processus d'absorption a lieu.
- Rouge : le garnissage flottant empêche la formation d'aérosols dans le laveur.
- Violet : Le puisard recueille le TCF provenant de la partie active. Celui-ci est pompé à nouveau dans l'absorbeur à partir d'ici.
- Vert : le démailleur empêche la goutte de liquide de quitter l'absorbeur.

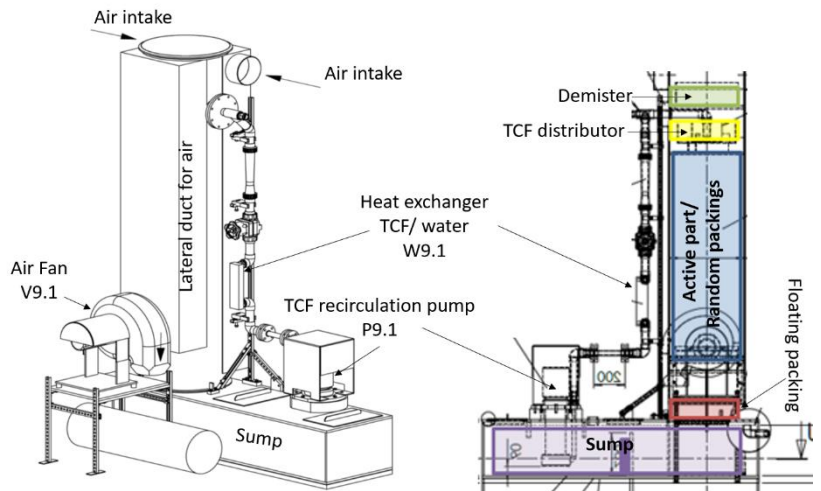


Figure 10. Composants de l'absorbeur.

L'air est aspiré dans l'absorbeur par un ventilateur. Le ventilateur (V9.1) est situé du côté de la sortie d'air. L'absorbeur fonctionne en dessous de la pression ambiante. Cette solution empêche l'air non traité de s'échapper de l'absorbeur.

Côté TCF, le TCF est aspiré du puisard par la pompe de circulation (pompe centrifuge immergée – P9.1) et pompé dans la tête de l'absorbeur via l'échangeur de chaleur à plaques (W9.1), où il est réparti uniformément sur la garniture par un distributeur de liquide.

L'épurateur est complètement immergé dans le puisard et possède des orifices de sortie pour la solution saline au fond. Ce siphon sépare l'air dans l'épurateur de l'atmosphère dans le réservoir de récupération, ce qui lui permet de fonctionner en atmosphère ouverte par rapport à l'environnement de la serre. Entre le laveur et la pompe de circulation de la solution se trouve un trop-plein dans le réservoir de stockage, qui assure un débit régulier et empêche ainsi l'apparition d'une répartition hétérogène de la concentration de TCF.

Toutes les parties de l'absorbeur qui entrent en contact avec le TCF sont en polypropylène ou en chlorure de polyvinyle. L'échangeur de chaleur est recouvert d'une matière plastique (parlyène) du côté de la solution.

Absorbeur : contrôle de la température et de l'humidité de l'air

L'humidité de l'air est contrôlée par la concentration en TCF, tandis que la température de l'air est contrôlée par la température du TCF.

La concentration de TCF dans l'absorbeur doit être maintenue à un certain pourcentage afin de permettre le processus d'absorption. Ce n'est qu'ainsi qu'il est possible de contrôler l'humidité de l'air dans la serre. Un TCF trop dilué peut provoquer la Humidité de l'air ne pas plus contrôler.

Le processus de contrôle de l'humidité est exécuté par lots. Dès que le point de mesure MR1 indique un taux d'humidité trop élevé, le puisard de TCF est vidé et rempli de TCF concentré.

La température de l'air est mesurée à la sortie de l'absorbeur (TR 2). Si la température est en dehors de la plage requise, par exemple trop basse ou trop élevée, le TCF est chauffé ou refroidi dans l'échangeur de chaleur illustré à la Figure 11. Dans la serre suisse, l'échangeur de chaleur est un échangeur de chaleur TCF/eau.

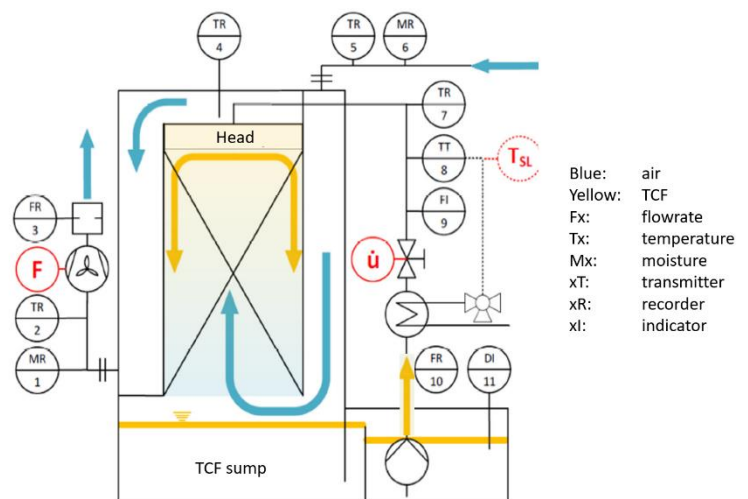


Figure 11. Absorbeur : contrôle de la température et de l'humidité de l'air.

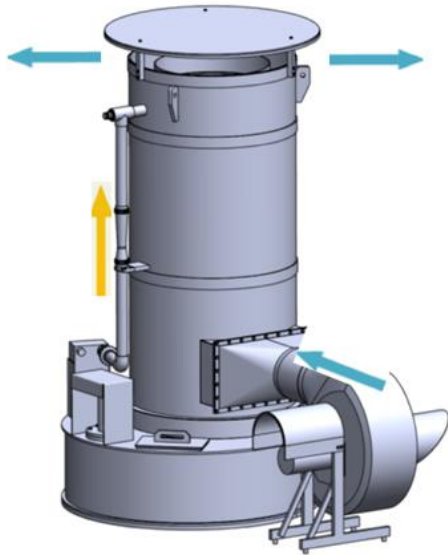


Figure 12. Modèle de desorber.

Desorber : Régénération

The desorber is used to regenerate (referred also as to concentrate) the diluted TCF.

Le désorbeur est utilisé pour régénérer le TCF dilué. La solution résultante est également appelée concentré)

Le désorbeur a la même conception que l'absorbeur, mais il fonctionne en surpression. Le ventilateur est situé à l'entrée de l'air. L'air entre directement par le bas dans le désorbeur et sort par le haut.

L'échangeur de chaleur est utilisé pour fournir l'apport d'énergie nécessaire au processus de désorption.

La température dans le désorbeur pour le processus de régénération (par exemple, le processus d'évaporation de l'eau contenue dans le TCF et son absorption par l'air)

affecte la vitesse nécessaire pour obtenir la concentration requise de TCF.

Le fonctionnement du désorbeur est également un processus par lots. Le puisard du désorbeur est initialement vide. Pour la régénération, il est rempli avec du TCF dilué, qui est renvoyé hors du puisard par le désorbeur et finalement de nouveau dans le puisard. La concentration de TCF est déterminée sur la base de la mesure de la densité et de la température de la solution. Lorsque la concentration maximale de TCF est atteinte (32 % dans le démonstrateur suisse), le processus de désorption s'arrête et le TCF concentré est pompé du puisard du désorbeur vers le réservoir de TCF concentré.

Vous trouverez plus de détails sur le site web de Cordis ou sur le site web de TheGreefa sous Téléchargement/Publications, dans le document ***Concept for a fully automated system and operating manual***.

Voici les liens :

Cordis : <https://cordis.europa.eu/project/id/101000801/results/>

TheGreefa : https://thegreefa.eu/wp-content/uploads/2024/06/THEGREEFA_D1.3-Control-system-and-operating-manual.pdf

2.1. Démonstrateur en Suisse

Les résultats présentés ici concernent le démonstrateur suisse du projet TheGreefa. Le démonstrateur suisse est une serre de 600 m² située près de Zurich. Elle a été spécialement conçue pour la culture d'orchidées. Les plantes ne sont pas placées directement sur le sol, mais cultivées sur des tables, comme dans la Figure 13.



Figure 13. Tables de plantation dans le démonstrateur suisse. L'absorbeur est indiqué en vert.

Bilan énergétique dans le démonstrateur suisse

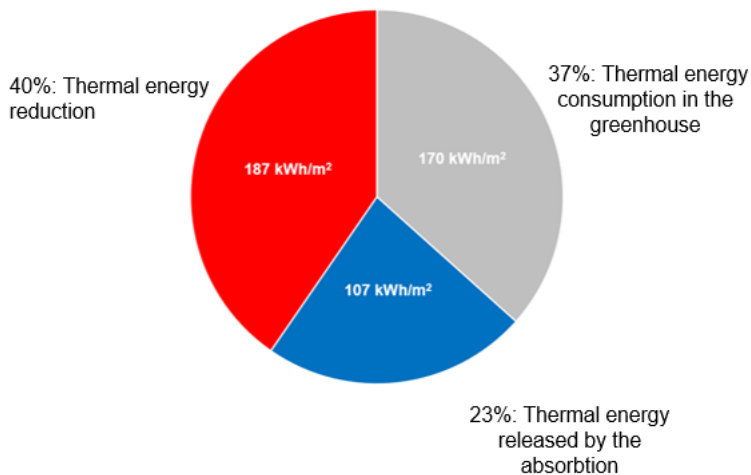


Figure 14. Bilan énergétique thermique annuel dans le démonstrateur suisse.

Sur la base de données mesurées et interpolées sur plus d'un an, le site les économies d'énergie que la technologie TheGreefa a permis de réaliser dans les serres suisses. Les 100 % du diagramme en camembert (Figure 14) représentent l'énergie thermique qui aurait été nécessaire dans la serre sans TheGreefa. La partie rouge indique les économies d'énergie que TheGreefa a permis de réaliser.

Le contrôle de l'humidité basé sur l'absorption permet d'économiser de l'énergie au lieu d'évacuer de l'air chaud et humide vers l'extérieur. La partie bleue

représente l'énergie thermique libérée pendant le processus d'absorption. Cette partie bleue représente l'énergie nécessaire pour chauffer la serre. Celle-ci ne doit toutefois pas être fournie par l'exploitant de la serre. Il s'agit de l'énergie nécessaire à la régénération du TCF, par exemple sous la forme d'énergie thermique à basse température, qui resterait autrement inexploitée.

La caractéristique de TheGreefa est que la disponibilité de cette énergie ne doit pas coïncider avec son utilisation dans le temps et l'espace. Cette énergie peut être stockée sous forme de TCF concentré pendant de longues périodes sans perte d'énergie, avec un potentiel de libération d'énergie thermique au lieu que l'énergie thermique soit conservée. Enfin, le segment gris de la figure représente l'énergie thermique qui doit être fournie par l'exploitant de la serre.

Cependant, pour la consommation d'électricité, la situation est inversée : l'exploitant de la serre doit fournir effectivement cette part.

Cependant, la situation est inversée si l'on considère la consommation d'électricité. Comme le montre la Figure 15, la consommation électrique augmente d'environ 24% avec l'installation de TheGreefa. Il est important de noter que les composants mécaniquement actifs, tels que les pompes et les ventilateurs, installés dans le démonstrateur TheGreefa n'ont pas été spécifiquement optimisés pour leurs performances électriques. De plus, la conception des conduits d'air et des échangeurs de chaleur s'est concentrée sur les performances thermiques, ce qui a entraîné des pertes de pression importantes et élevées. Il existe donc un potentiel supplémentaire de réduction de cette surconsommation par des étapes d'optimisation.

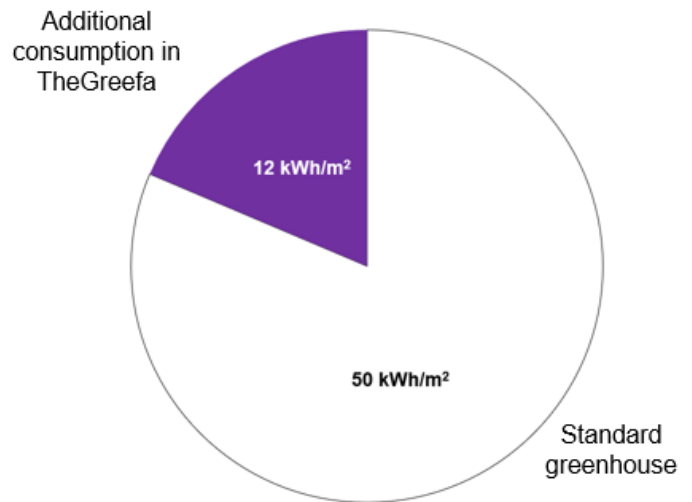


Figure 15. Consommation annuelle d'électricité dans le démonstrateur Suisse.

Si l'on considère le bilan énergétique global dans la serre suisse, on constate que l'énergie électrique a un impact moindre par rapport à l'énergie thermique. Si nous excluons l'énergie utilisée pour la régénération - soit parce qu'elle est gérée séparément par l'exploitant de la serre, soit parce qu'elle est inutilisée d'une autre manière - l'économie d'énergie totale dépasse les 50%. Même en tenant compte de l'énergie de régénération, il est possible de réaliser des économies substantielles d'environ 35%.

Tableau 1. Résumé du bilan énergétique dans les serres suisses.

	TheGreefa kWh/m ² year	W/o TheGreefa kWh/m ² year
Thermal energy	155	464
Electric energy	62	50
Total	217	514
Energy for regeneration (low temp. heat)	107	
Total incl. regeneration	324	514

Résultats du TCF

Sur la base des données de mesure du TCF concentré utilisées dans le démonstrateur (ligne bleue de la Figure 16), la production de TCF concentré (ligne verte de la Figure 16) a été simulée en utilisant de l'eau chaude provenant de la source de chaleur produite par des panneaux solaires thermiques situés à proximité de la serre. Environ 100 m² de modules solaires thermiques sont nécessaires pour la serre suisse, soit environ un sixième de la surface de la serre. Il est intéressant de noter que la régénération du TCF a lieu toute l'année, car elle dépend de la différence de température entre l'air et le TCF, et non de la température absolue. Pendant les mois les plus froids, la production diminue légèrement en raison du raccourcissement des jours et de l'augmentation de la couverture nuageuse.

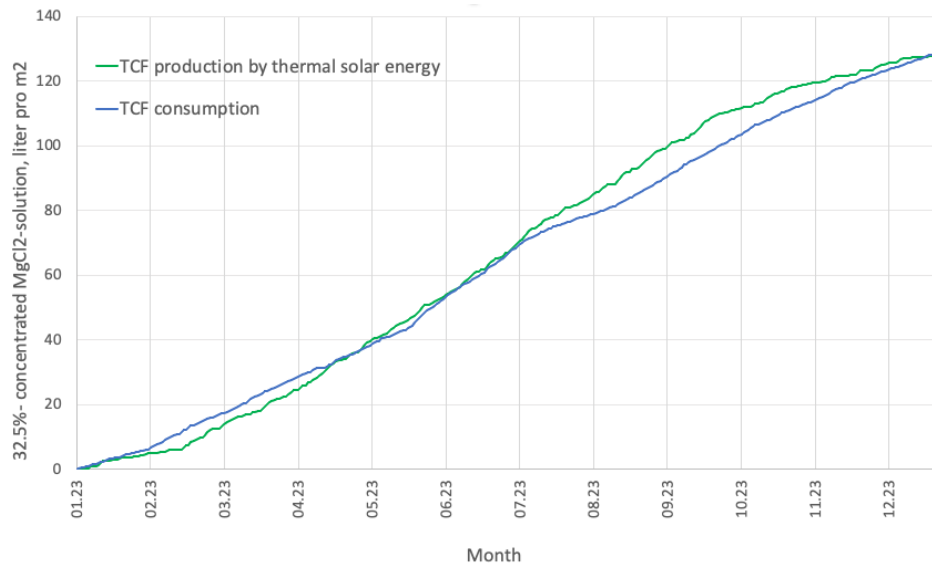


Figure 16. Résorption et régénération du TCF (MgCl₂).

En se basant sur la quantité et le schéma d'utilisation du TCF utilisé et régénéré, la taille minimale requise pour le stockage du TCF a été déterminée (Figure 17). Une seule unité de stockage est nécessaire, car les différentes densités de TCF concentré et dilué empêchent tout mélange. Pendant la saison froide, la consommation de TCF est élevée et la régénération un peu plus faible ; Jusqu'à la fin de cette saison (mars), le stockage est entièrement occupé par le TCF dilué. Inversement, à la fin de la saison chaude, le réservoir est entièrement rempli de TCF concentré en raison de conditions opposées. Le volume de stockage nécessaire est d'environ 175 litres par mètre carré de serre.

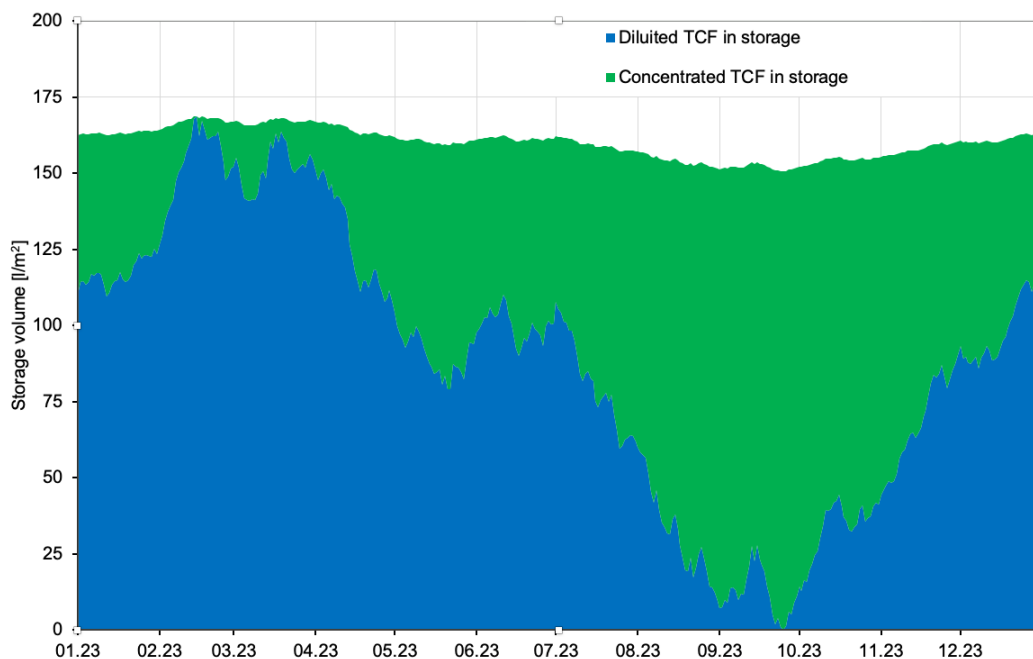


Figure 17. Volume de stockage.

Séchage des aliments

Le processus de séchage est très similaire à la procédure de contrôle de l'humidité et de la température dans la serre. La différence est que dans ce cas, l'approche consiste à déshumidifier l'air sans contrôle de la température.

Cette application est expliquée dans la Figure 18. L'air est séché dans un absorbeur à contre-courant avec un TCF concentré, mais pas nécessairement chauffé, car la chaleur pourrait endommager les feuilles ou les fruits et affecter leur qualité. La configuration de l'absorbeur peut être la même que celle de l'absorbeur utilisé dans la serre. Dans un circuit fermé, l'air sec libéré est ensuite introduit dans la chambre de séchage, où l'humidité des légumes peut être absorbée.

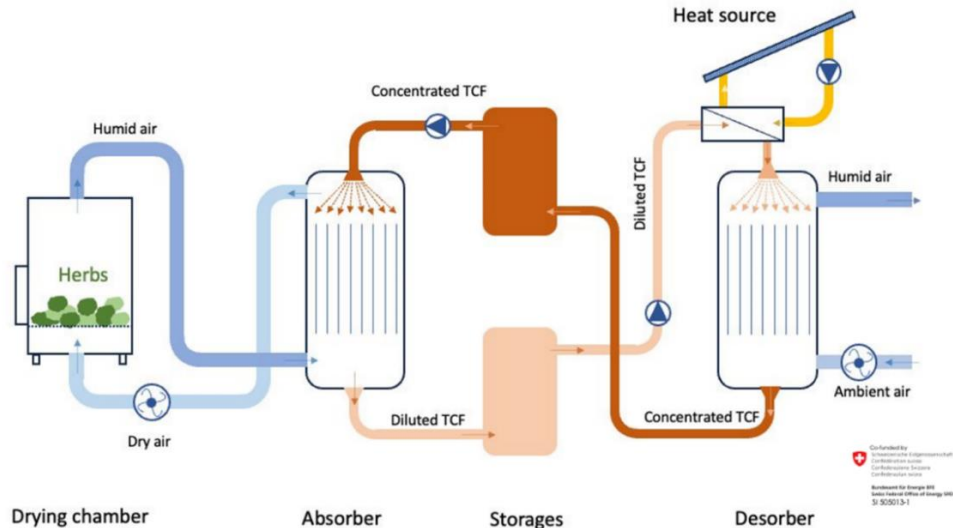


Figure 18. Processus de séchage avec l'absorbeur et le désorbeur.

Le TCF dilué peut ensuite être stocké et régénéré sans perte de chaleur dès qu'une chaleur renouvelable (par exemple, la chaleur solaire) est à nouveau disponible. Par rapport aux installations modernes de déshumidificateurs à compression, la consommation d'énergie électrique dans un sécheur à sorption se limite au fonctionnement des ventilateurs et des pompes à liquide, tandis que l'énergie thermique nécessaire peut être entièrement fournie par une source de chaleur à basse température, idéalement entièrement basée sur des sources renouvelables. Après le processus de régénération, l'énergie fournie peut également être stockée sans perte.

Sélection TCF

Le choix du TCF pour l'utilisation en séchoir est différent de celui pour l'utilisation en serre.

La Figure 20 montre la ligne d'équilibre entre différents TCF et l'air humide. Les lignes en pointillés représentent l'air avec différentes humidités. Les points d'intersection entre les lignes de solubilité des TCF et celles de l'air indiquent l'humidité minimale qui peut être atteinte à une température donnée. Par exemple, à 20 °C avec une solution de $MgCl_2$, le taux de déshumidification maximal ne descend pas en dessous de 35 %. Le $MgCl_2$ a été choisi dans les serres pour sa disponibilité et son faible coût, mais son hygroscopicité est limitée. À 20 °C, l'humidité ne peut pas être abaissée en dessous de 35 % RH. Alors que cette humidité n'est pas acceptable pour la culture des plantes, car elle est trop basse, elle est trop élevée pour un processus de séchage. Les solutions LiBr ou LiCl pourraient constituer une alternative coûteuse.

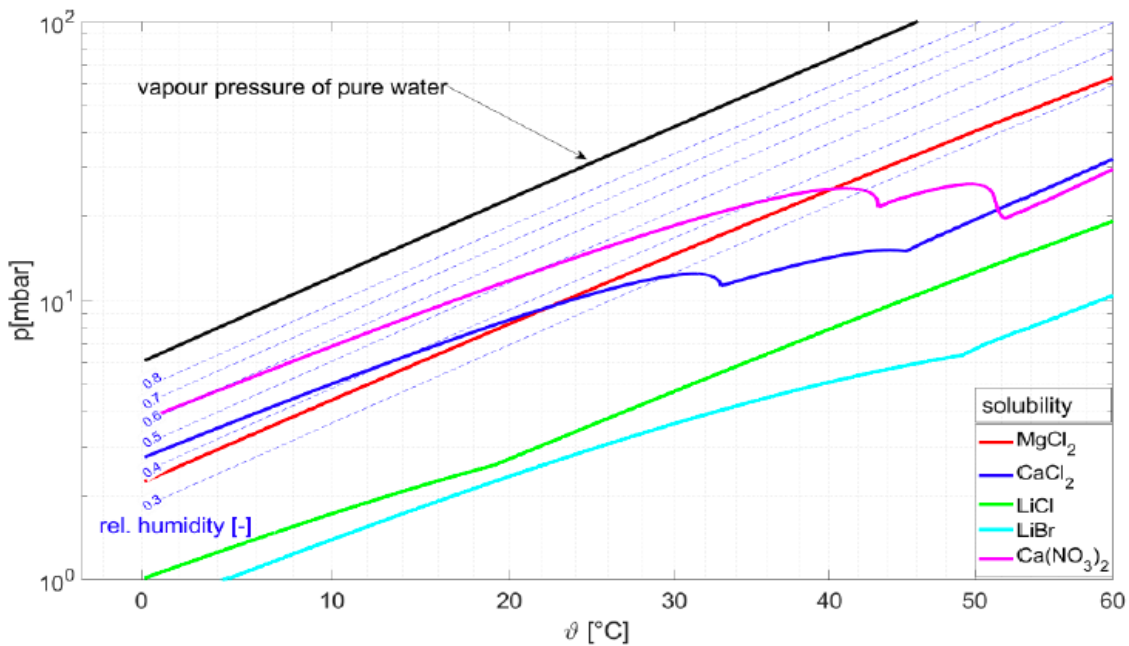


Figure 20. Comparaison de différents TCF.



Figure 19. Dryer's interior with dried herbs.

Tableau 2. Différents TCF ont été utilisés pour le processus de séchage testé.

Salt (TCF)	Chemical compounds	Air humidity at the equilibrium, 20°C
Caesium fluoride	CsF	3.38 %rH
Lithium bromide	LiBr	6.61 %rH
Zinc bromide	ZnBr ₂	7.94 %rH
Sodium hydroxide	NaOH	8.91 %rH
Potassium hydroxide	KOH	9.32 %rH
Lithium chloride	LiCl	11.31 %rH
Calcium bromide	CaBr ₂	16.50 %rH

Pour le processus de séchage, nous voulions trouver et tester un TCF ayant de meilleures propriétés hygroscopiques que le MgCl₂, mais à un coût abordable. De plus, il devait s'agir d'un TCF compatible avec l'industrie alimentaire. Les propriétés des différents TCF ont été analysées dans le Tableau 2 et le choix s'est porté sur le NaOH, qui est largement utilisé en boulangerie et répond à ces exigences.

Un problème qui peut survenir lors de l'utilisation de NaOH est sa réactivité avec le CO₂ présent dans l'air. Cette réaction forme des carbonates qui précipitent, de sorte que le précipité doit être éliminé et le NaOH qui a réagi doit être reconstitué. Ce problème peut être minimisé, voire éliminé, en faisant circuler l'air dans un circuit fermé. Dans la Figure 21, le CO₂ qui réagit avec le NaOH pendant le processus de régénération est représenté en bleu. Dans l'installation de la ZHAW, la régénération a eu lieu en circuit ouvert, avec un apport continu d'air ambiant neuf. Dans ce cas, un remplissage continu de NaOH est nécessaire.

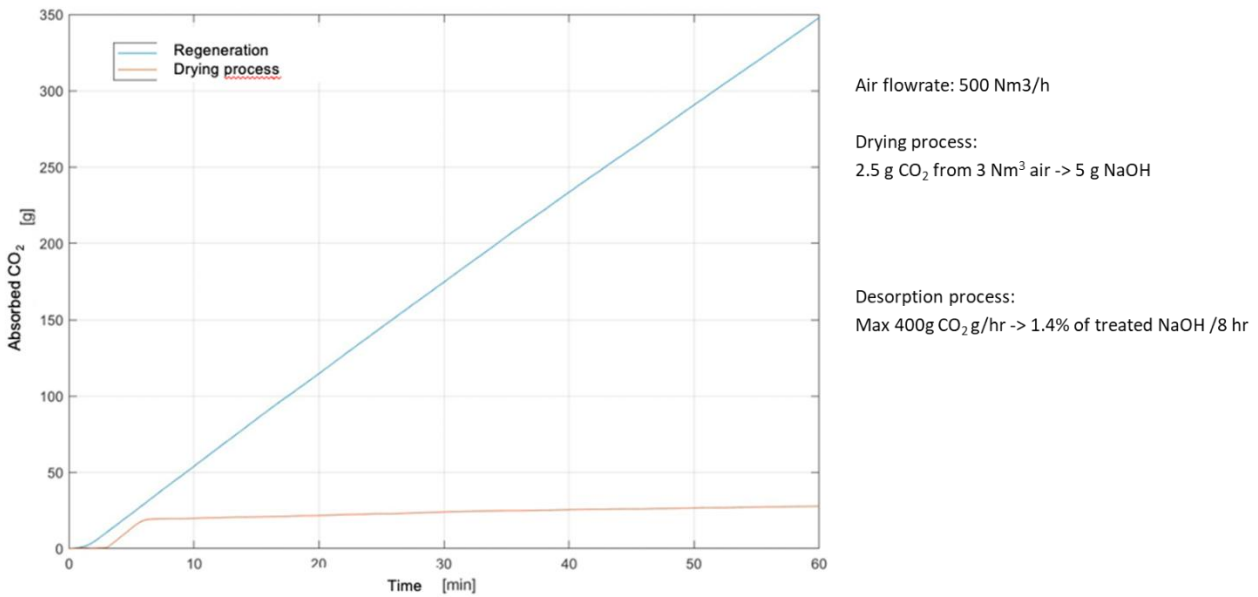


Figure 21. Réaction du CO₂ avec NaOH.

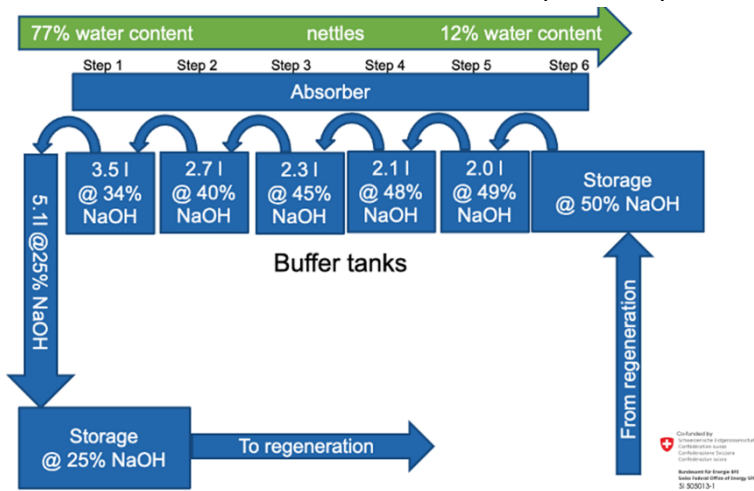
Pour déshumidifier l'air (processus de séchage) L'air est continuellement recyclé dans l'absorbeur. Comme le montre la ligne rouge, le CO₂ ne réagit initialement qu'avec le NaOH ; dès que son niveau descend en dessous du seuil de réaction, il n'est plus éliminé. Il n'est pas nécessaire de rajouter du NaOH. Les carbonates formés précipitent dans la solution de NaOH et peuvent être éliminés à la fin du cycle de séchage.

Optimisation des processus

La concentration de TCF utilisée dans les tests de laboratoire était de 50 % au début du processus de séchage et de 44 % à la fin. Il n'a jamais été remplacé pendant toute la durée du processus de séchage.

Le pouvoir d'absorption était donc plus élevé au début qu'à la fin. Cependant, dans la phase finale, il est plus difficile d'extraire l'humidité restante des herbes presque séchées.

Une concentration élevée de TCF n'est pas indispensable au début du processus de séchage, alors



The values are per kg of dried herbs.

Figure 22. Concept proposé pour le processus de séchage.

qu'elle est indispensable dans la phase finale. C'est la raison pour laquelle le schéma de la Figure 22 présentée sur concept est proposé. Le processus commence par un TCF dilué, qui est ensuite remplacé par un TCF de plus en plus concentré au cours des étapes suivantes. Ceci peut être réalisé en utilisant le TCF de la dernière étape d'un lot d'herbes dans une étape précédente.

TCF est tellement dilué qu'il ne peut plus être absorbé, il est dirigé vers la régénération ou vers le réservoir de TCF dilué.

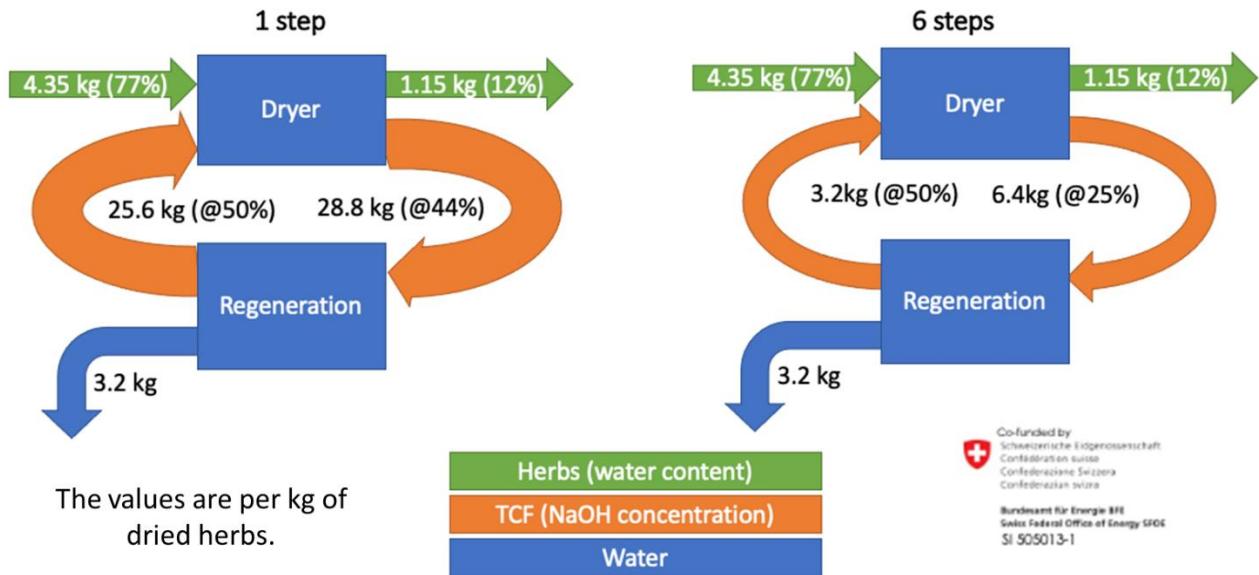


Figure 23. Réduction du volume dans le processus par étapes.

Grâce à un processus progressif, il est possible de réduire le volume nécessaire au stockage, comme le montre la Figure 23. L'énergie nécessaire à la régénération reste la même que la quantité d'eau à évaporer.

Comparaison énergétique

La consommation d'énergie spécifique d'une installation complète, y compris la régénération du TCF, a été estimée et comparée à l'installation réelle. Dans le schéma de la Figure 24, les flèches bleues l'énergie électrique et les flèches rouges l'énergie thermique.

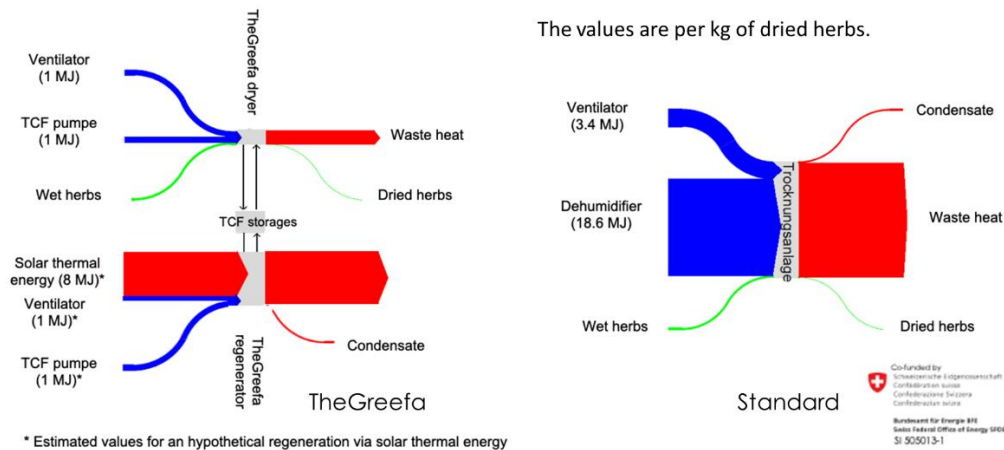


Figure 24. Comparaison énergétique entre le processus de séchage TheGreefa et le séchage standard.

Si l'on considère que la régénération utilise de l'énergie thermique qui n'est pas utilisée autrement (en particulier de l'énergie gratuite), la consommation d'énergie spécifique de TheGreefa est nettement inférieure à celle d'un séchage traditionnel avec un déshumidificateur. Il est important de souligner que le grand avantage de TheGreefa ne réside pas seulement dans le fait que le processus consomme moins d'énergie qu'une installation traditionnelle, mais aussi parce que l'énergie thermique nécessaire est fournie par l'eau du robinet processus de séchage.

Cette énergie thermique peut être entièrement obtenue à partir d'énergie renouvelable ou de chaleur résiduelle à basse température, qui resterait sinon inutilisée. De plus, TCF peut stocker indirectement de l'énergie thermique sur une longue période, sans perte d'énergie.

2.2. Démonstrateur en Tunisie

L'objectif principal de ce projet pilote dans la serre de démonstration en Tunisie est d'étudier un système de climatisation pour une serre fermée basé sur les fluides de sorption thermochimiques (TCF). L'étude se concentre sur l'évaluation de l'efficacité du système à créer un climat équilibré et contrôlé dans les conditions climatiques de la Tunisie. L'accent est mis sur la possibilité de récupérer l'eau par évaporation et condensation combinées. Étant donné que l'apport solaire génère d'importantes quantités de chaleur qui, dans les serres conventionnelles, sont évacuées par la ventilation extérieure, un nouveau système de refroidissement avec évacuation de la chaleur par la surface extérieure est à l'essai. La nouvelle conception vise à fournir une surface beaucoup plus grande pour la dissipation de la chaleur. Parallèlement, la collecte des gouttelettes est améliorée grâce à une inclinaison plus importante du film, en particulier au niveau supérieur du toit du tunnel. Pour ce faire, la serre a été conçue en forme d'accordéon, ce qui permet d'augmenter la surface extérieure de 70%.

Le système repose sur trois points différents :

1. La régénération du TCF a lieu pendant la nuit avec la chaleur accumulée pendant la journée.
 - Ainsi, l'absorbeur peut également être utilisé comme régénérateur avec un décalage dans le temps.
 - Le stockage de la chaleur thermique s'effectue pendant la journée dans un grand réservoir de stockage en cas de dégagement de chaleur la nuit (collecte passive du froid nocturne).
 - Il est également possible d'améliorer la régénération avec des sources de chaleur supplémentaires (capteurs solaires en plastique peu coûteux, éventuellement chaleur résiduelle provenant de CSP).
2. Accumulation de CO₂ dans l'atmosphère fermée (1000 - 2000 ppm) :
 - Cela permet d'améliorer considérablement la performance de la photosynthèse et d'augmenter le rendement si d'autres facteurs de croissance tels que l'eau et les nutriments sont également fournis de manière optimale.
 - Une meilleure acceptation de la chaleur par les plantes peut être obtenue par un apport suffisant de CO₂ (même lorsque les stomates sont fermés en raison d'un stress thermique et/ou hydrique). L'augmentation des températures de croissance optimales permet également de réduire indirectement les dépenses liées aux mesures de refroidissement.
3. Récupération de l'eau par évapo-condensation combinée :
 - L'eau est amenée de l'humidité de l'air vers le TCF pendant la journée.
 - L'eau du TCF (solution diluée) est à nouveau évaporée (régénérée) pendant la nuit avec la chaleur accumulée la veille et libérée dans l'air de la serre.
 - Il se produit alors une condensation d'eau sur la surface intérieure du film,

- Élimination des gouttes d'eau grâce à une forme de toit modifiée qui offre une inclinaison suffisante pour éliminer et recueillir les gouttes,
- Évacuation de la chaleur grâce à une forme de toit modifiée ("en zigzag") pour une plus grande surface totale lors de l'évacuation de la chaleur.

Principaux composants du système

Les principaux composants de l'usine pilote en Tunisie sont :

- La serre avec l'enveloppe extérieure modifiée,
- Deux unités d'absorption de taille légèrement différente, qui peuvent être utilisées soit individuellement, soit ensemble.
- fonctionner en parallèle,
- Le circuit d'absorption avec les dispositifs de stockage thermo-chimique et thermique, les pompes et les tuyaux de raccordement,
- Le circuit d'air entre l'absorbeur et la serre,
- Le système de contrôle avec capteur/actionneur.

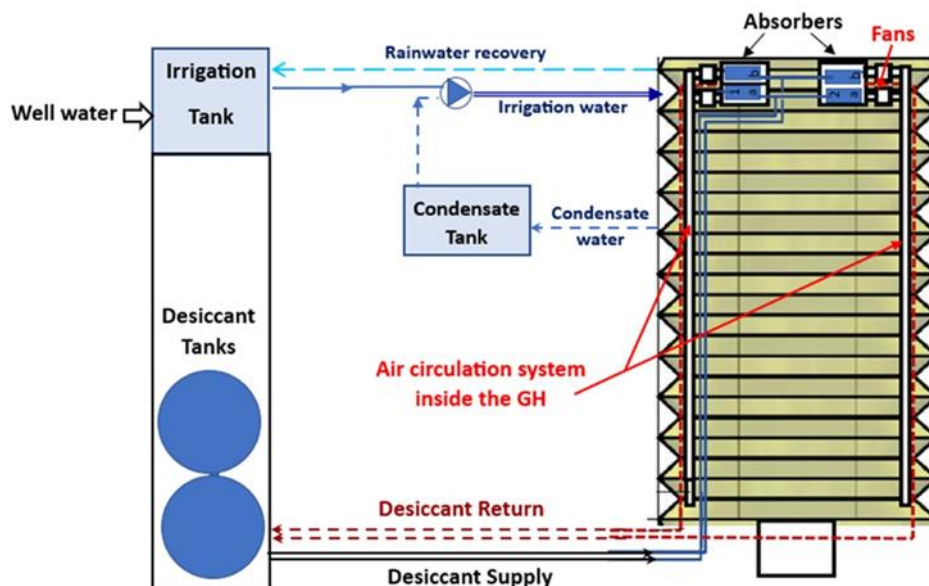


Figure 25. Schéma du système.

La nouvelle conception vise à obtenir une surface beaucoup plus grande pour la dissipation de la chaleur. Parallèlement, la séparation des gouttes est améliorée grâce à une inclinaison plus importante du film, en particulier au niveau supérieur du tunnel.

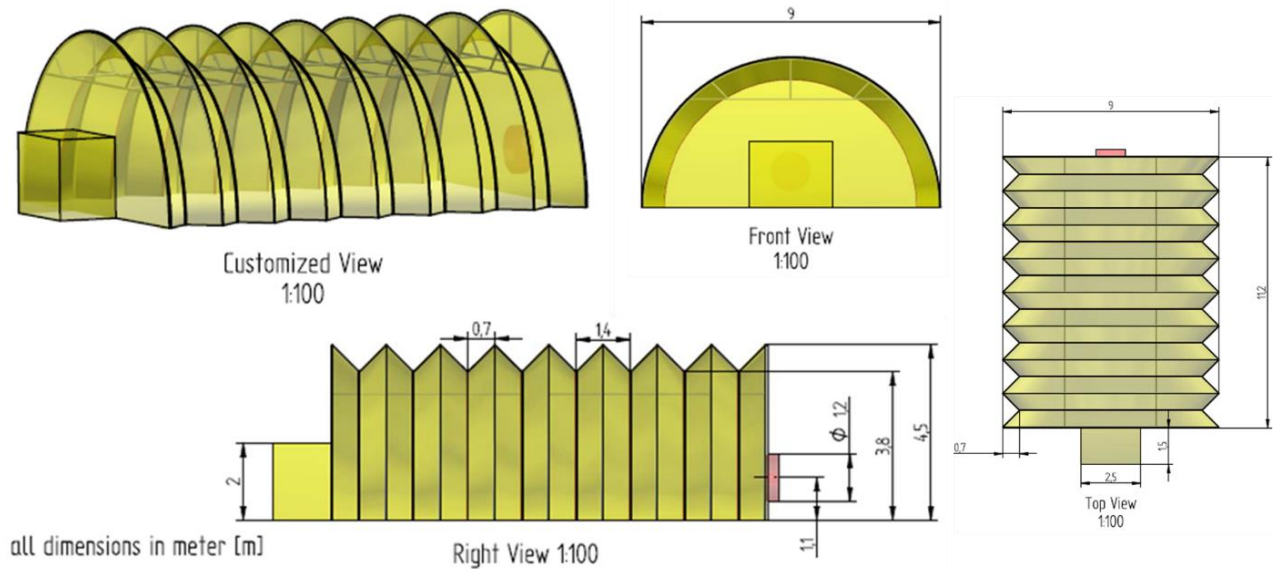


Figure 26. Spécifications techniques de la structure de la serre (forme en zigzag).



Figure 27. La serre fermée de 100 m² (en haut) et avec un réservoir de 1 m³ pour la collecte de l'eau de pluie et de la condensation (en bas).

Le réservoir d'eau illustré à la Figure 27 est un réservoir combiné qui recueille à la fois l'eau de pluie du toit de la serre et les gouttelettes d'eau condensée de la surface intérieure du film de la serre.

Construction de l'absorbeur

Absorbeur est le composant principal du système de climatisation et assure la circulation à contre-courant de la solution de saumure vers le site à partir de l'air aspiré dans la serre.

Cette circulation permet de réguler à la fois la température et l'humidité de l'air. Pour ce faire, la chaleur latente est transformée en chaleur sensible et transmise au réservoir par le biais du flux solaire. De plus, l'humidité de l'air est absorbée.

Cela réduit l'humidité relative dans la serre et permet aux plantes d'évaporer plus d'eau, augmentant ainsi leur propre capacité de refroidissement.

L'absorbeur a été fabriqué par le groupe de travail de l'Université Technique de Berlin (TUB).



Figure 28. l'absorbeur installé dans le démonstrateur tunisien (à gauche) et la structure interne de l'absorbeur pour la distribution du TCF sur la surface de contact (à droite).

Les premiers tests du prototype d'absorbeur ont fourni des indications claires sur les déficits de la distribution de liquide. L'analyse infrarouge (IR) (Figure 29) a montré que le dégagement de chaleur dans le processus en cours est inégal en raison des différences de débit au centre (faible débit) et sur le pourtour (débit élevé). L'utilisation d'un fluide coloré a également permis de mettre en évidence des problèmes de répartition inégale. La répartition inégale de l'air au fond de l'absorbeur a été démontrée par l'analyse du brouillard. L'air était principalement dirigé vers le haut à partir d'une zone proche de l'entrée d'air, car les éléments de l'absorbeur étaient disposés de manière étanche dans la partie inférieure.

Les déficits mis en évidence par les essais ont conduit à une nouvelle conception des absorbeurs.

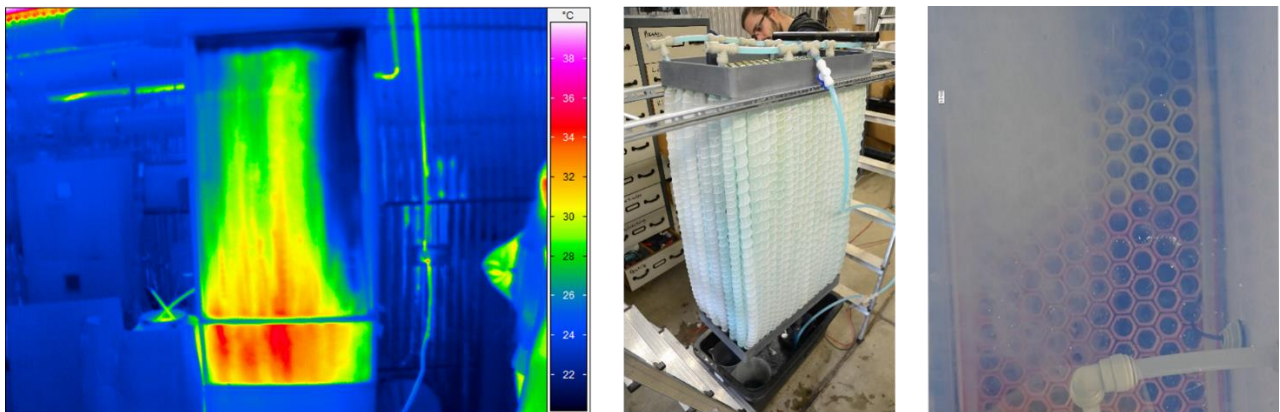


Figure 29. Analyse IR (gauche), analyse de liquides colorés (centre) et analyse de brouillard (droite).

Un nouveau design prévoit notamment une conception améliorée des éléments de distribution de saumure, avec un diamètre décroissant vers le bas, permettant à l'air de pénétrer dans la partie interne du volume.

La nouvelle conception de l'élément de distribution vise à décentraliser l'alimentation en liquide entre les ouvertures hexagonales. Une entrée centrale sur la face inférieure (voir Figure 30) est reliée à un système de canaux internes dans la partie imprimée, ce qui permet d'acheminer le liquide vers de

nombreuses ouvertures réparties de manière décentralisée. Ainsi, tous les éléments de surface sont alimentés par la même quantité de liquide.

La conception est optimisée pour un débit élevé (20l/min, extraction de ~20 kW de chaleur à $\Delta T=5K$). Cette optimisation permet d'équilibrer le débit de la solution.



Figure 30. La conception de l'absorbeur avec une structure interne hexagonale imprimée en 3D.

Études sur le TCF disponible localement dans une saline tunisienne

Le potentiel d'absorption d'une solution de saumure fournie par la Sallina Sfax (Mare Alb) a été testé dans des conditions climatiques de serre. Le fonctionnement du dispositif d'absorption du système est basé sur les propriétés hygroscopiques du TCF utilisé, qui est une solution de saumure composée d'une solution de chlorure de magnésium ($MgCl_2$) avec des composants de sulfate de magnésium. Des mesures ont été effectuées pour l'air dans un conteneur contenant une solution de saumure par rapport à l'eau afin de déterminer la température de l'air et de mesurer l'humidité.

Les mesures en laboratoire ont révélé la composition suivante de la saumure :

- Densité : 1 350 g/l
- Magnésium Mg : 112,65 g/l,
- Sulfate SO_4 : 34,09 g/l,
- Autres composants (Cl , Ca, K...) : 428 g/l.
- de l'eau.



Figure 31. Mesure avec 2 bouteilles.

Les mesures de l'humidité relative d'équilibre (ERH) ont été effectuées en janvier 2022 selon la méthode de la solution saline saturée, qui consiste à placer un échantillon de la solution de saumure dans un récipient scellé et à mesurer l'humidité relative de l'air en contact avec le TCF. Lorsque l'air atteint l'équilibre avec la saumure, son humidité relative correspond à l'ERH du dessiccateur.

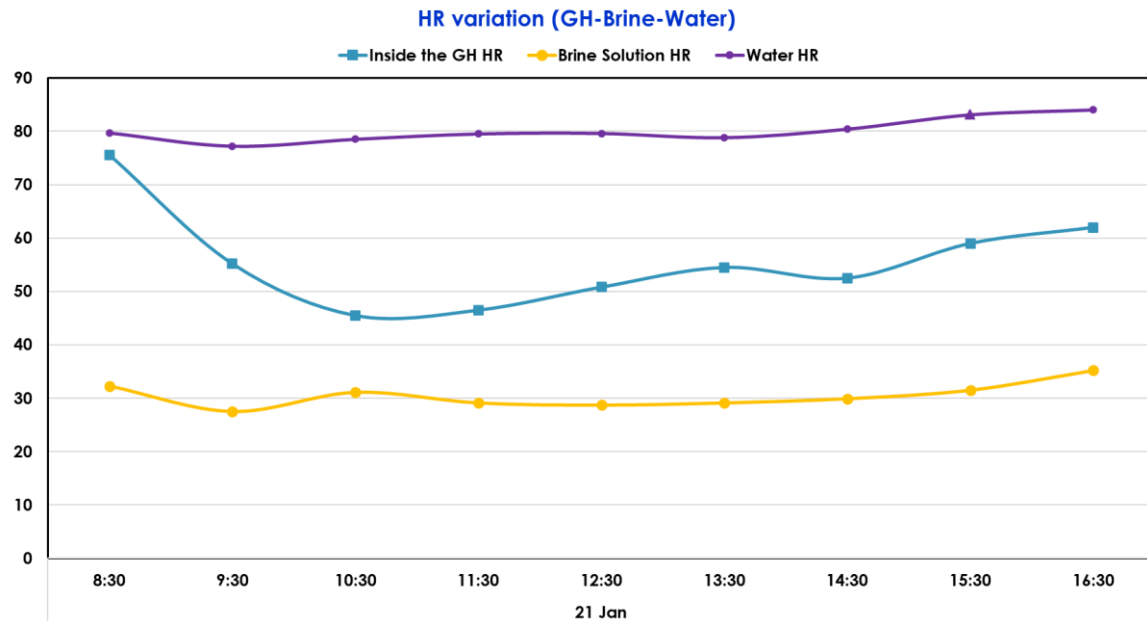


Figure 32. Capacité de séchage de la solution de saumure (jaune) par rapport à l'eau (violet) (21.01.2022)

Les valeurs mesurées de l'ERH sont conformes à la littérature établie, qui se base sur une valeur ERH de $32,78 \pm 0,16$ % pour une solution saturée pure de $MgCl_2$ à 25 °C.

La courbe jaune de la Figure 32 montre le dessiccateur qui se trouve à une faible humidité relative. La courbe violette indique l'humidité relative dans l'autre Récipient qui ne contient que de l'eau. On peut y voir qu'il a une humidité relative très élevée, car l'air au-dessus de l'eau est naturellement presque saturé. La ligne bleue indique l'humidité relative de l'air de la serre qui entoure les deux conteneurs.

Circulation de l'absorption dans le système

Dans l'installation étudiée, deux réservoirs de stockage reliés entre eux, d'un volume total de 15 m³ de solution de saumure, ont été utilisés. Les réservoirs de stockage sont reliés aux absorbeurs par deux pompes et un système hydraulique. Les absorbeurs ont été montés sur des supports qui sont stockés au-dessus des réservoirs de stockage afin de permettre la recirculation de la solution TCF par gravité et de réduire ainsi la complexité du contrôle du système.

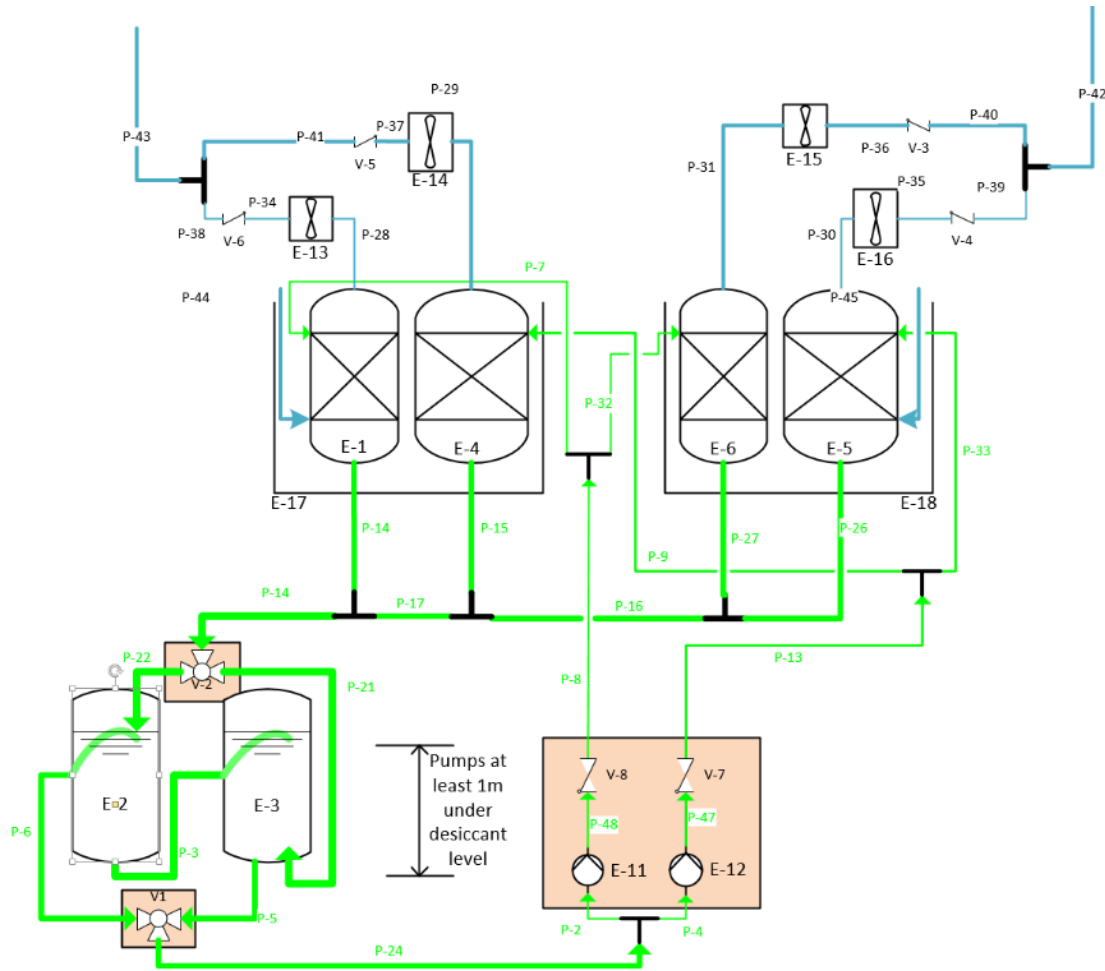


Figure 33. Installation des réservoirs de stockage et connexion des composants du système d'adsorption.



Figure 34. Pompes et électrovannes sur le réservoir de stockage.

Distribution de l'air dans la serre

L'air est aspiré depuis le niveau du toit et passe à travers l'absorbeur. Après l'échange thermique et le processus de déshumidification ou d'humidification, l'air traité est introduit dans la serre à hauteur des plantes.



Figure 35. Installation des unités d'absorption et du système de circulation d'air dans la serre (ventilateurs + gaines d'air).

La Figure 35 montre les absorbeurs situés à l'arrière de la serre et les tuyaux de distribution d'air sur les côtés (photo de gauche). Sur la photo de droite, on peut voir l'absorbeur installé.

Système de contrôle

Un ordinateur de contrôle surveille et régule les composants du système de climatisation. Le fonctionnement du système d'absorption est contrôlé en trois étapes en mode jour et en mode nuit. Le premier mode est exploité par une seule pompe. Le deuxième mode est actionné par la deuxième pompe plus grande. Dans le troisième mode, les deux pompes fonctionnent en parallèle.

Le monitoring mis en place permet d'effectuer les mesures suivantes :

- la température et l'humidité relative de l'air,
- la température et le débit du déshydratant,
- concentration de CO₂,
- le niveau de déshydratant dans les réservoirs de stockage.

Les données surveillées permettent d'évaluer le bilan énergétique et le rendement du système. à calculer.



Figure 36. Installation du boîtier électrique, des capteurs et du système d'acquisition de données.

Conclusions

En ce qui concerne le fonctionnement du démonstrateur, quelques conclusions et enseignements sont présentés ci-dessous :

- Un élevé niveau à Etanchéité à l'air dans le site serre est de est nécessaire, pour éviter conditions de condensation.
- Une ventilation d'urgence facilitant les erreurs est nécessaire, mais doit également intégrer le concept d'étanchéité soutenir.
- L'installation des absorbeurs doit se faire dans la serre (et non à l'extérieur).
- La conception innovante de l'absorbeur a réussi à réduire la complexité et les coûts.
- Les pièces imprimées en 3D nécessitent des plastiques de haute qualité, résistants à la chaleur et un Protection solaire.
- Le volume de stockage est coûteux et les connexions hydrauliques sont sujettes à des erreurs.
- L'utilisation du TCF requiert une grande attention en ce qui concerne la corrosivité, les fuites, l'élimination ou le recyclage.

Différentes mesures sont recommandées pour le développement du système :

- L'utilisation de matériaux à changement de phase (PCM) pour le stockage de la chaleur permet de potentiellement une réduction de 50 à 90% de la quantité de déshydratant.
- L'intégration du PCM directement dans l'absorbeur peut également réduire les coûts de pompage de 50 à 90%. ce qui entraîne également une légère réduction des besoins en ventilation (~30%).
- Il convient d'identifier un PCM peu coûteux pour un point de fusion d'environ 30°C. L'utilisation de graisse de friture recyclée ou de carbonate de sodium pourrait être envisagée.
- Il est possible de simplifier la construction en zigzag. Au final, la construction ne sera pas beaucoup plus chère que celle des serres tunnel existantes.

3. Simulations et optimisation - études de cas

3.1. Études de cas

Les principaux objectifs des études de cas sont d'analyser les différentes conditions limites en termes de deux régions climatiques européennes représentatives sélectionnées dans le cadre du projet.

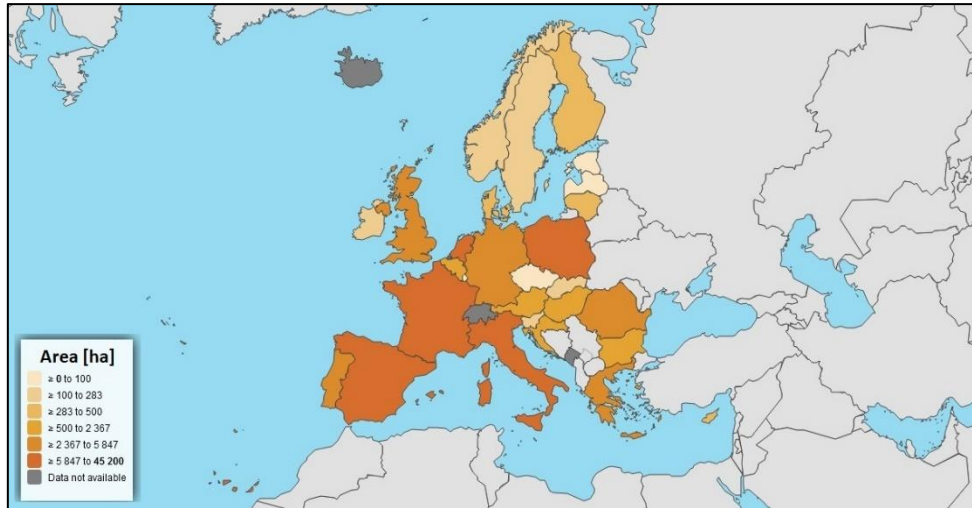


Figure 37. Taux de pénétration des serres dans les pays de l'Union européenne UE-27 (EUROSTAT, 2023a).

L'Espagne, qui possède le plus grand développement de serres horticoles en Europe, a été désignée comme zone d'étude prioritaire. En 2023, la superficie était de 77 923 ha.



Figure 38. carte des régions espagnoles avec différentes surfaces de serres.

L'Italie, avec une industrie de serres robuste, a été identifiée dans l'évaluation de marché précédente (D3.1) comme un premier marché potentiel pour TheGreefa. Dans ce pays, la superficie des serres était de 35.229 ha en 2023.

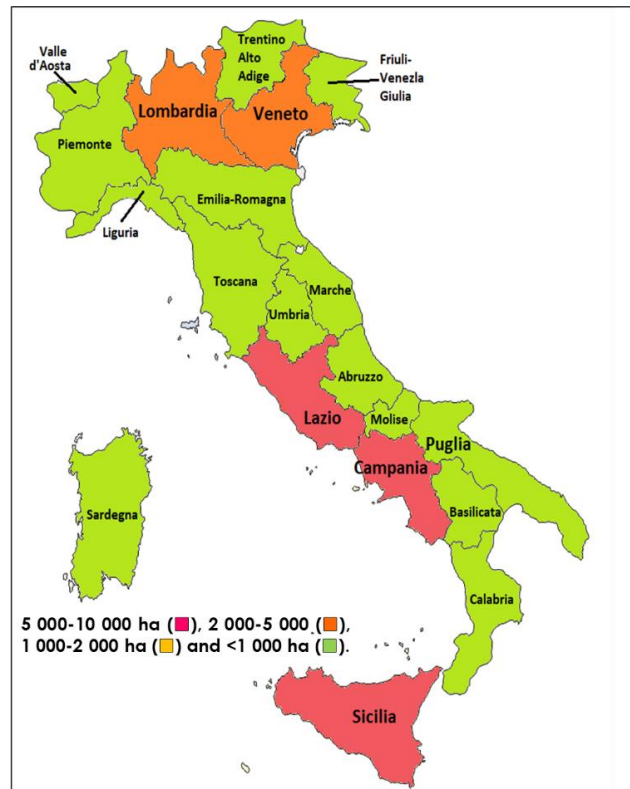


Figure 39. Carte des régions italiennes avec différents pourcentages de surface de serres.

La portée de l'analyse comprenait trois études de cas, initialement sélectionnées pour Almería (Espagne) ont été :

- Serre non chauffée de type Almería, à ventilation passive.
- Serre multichapelle non chauffée avec régulation climatique
- Serres multi-champs chauffées au gaz naturel.

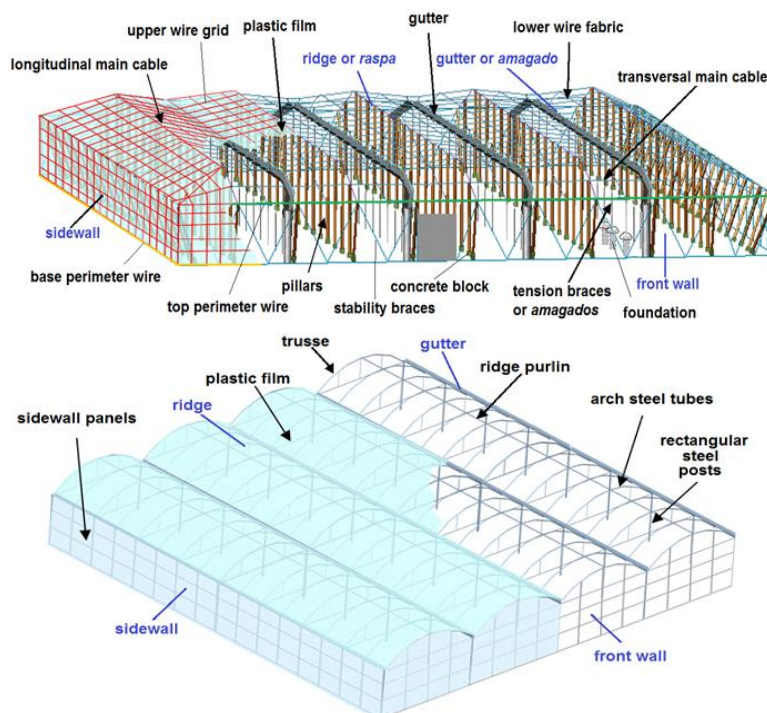


Figure 40. Serre simple de type Almeria avec structure "raspa y amagado" (en haut) et serre haute technologie avec structure multi-tendue (en bas).

Deux cultures de tomates développées au cours de la saison 2017/18 et de la saison actuelle 2023/24 ont été analysées dans la serre de type Almería de l'Université d'Almería. Au cours du développement du projet TheGreefa, plusieurs alternatives de combinaisons de cultures ont été cultivées dans des serres multichamps non chauffées : concombre-tomate, concombre-poivron et tomate-courgette.

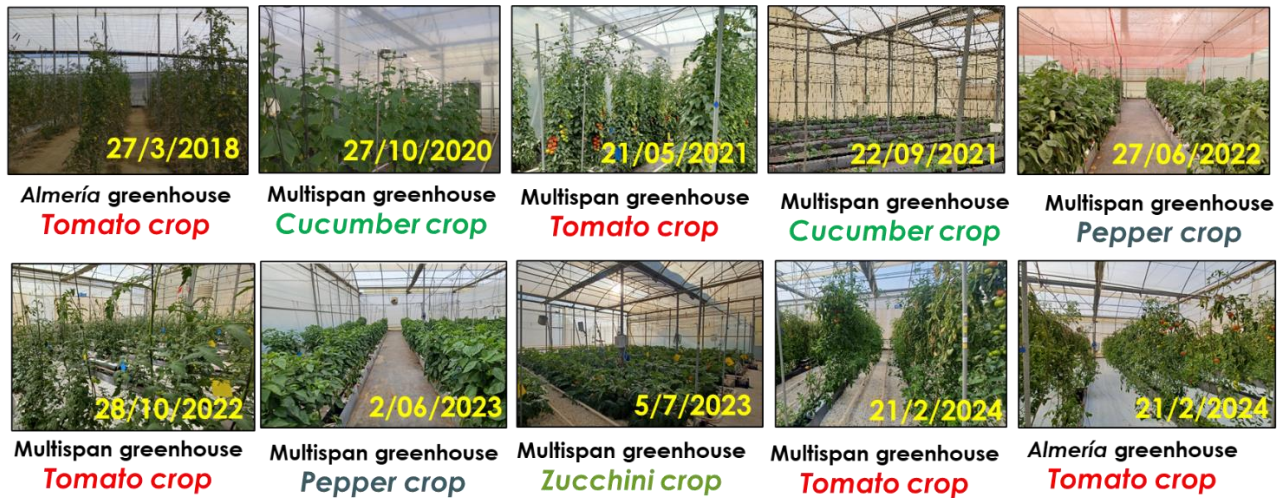


Figure 41. Principales cultures analysées à Almería et dans les serres multi-tensions de l'Université d'Almería.

En Italie, deux études de cas ont été sélectionnées pour la production de tomates :

- Serre multi-tension non chauffée.
- Serres multi-champs chauffées au gaz naturel, au fioul et aux copeaux de bois.



Figure 42. Récolte de tomates "cerises" dans des serres multichamps non chauffées (à gauche) et dans des serres multichamps chauffées (à droite).

Sources d'information

- La caractérisation technico-productive des serres d'Almería a été réalisée par une enquête menée en 2022 par la coopérative andalouse AFE auprès de 222 membres couvrant 610 serres (1,4 % de la superficie totale d'Almería).
- Les coûts de production des serres d'Almería pour les saisons 2021-22 et 2022-23 ont été analysés pour les serres non chauffées de type Almería pour sept alternatives différentes de cycles de culture, sur la base des données de l'Observatoire des prix et des marchés du ministère de l'Agriculture, de l'Élevage, de la Pêche et du Développement durable du gouvernement d'Andalousie - JA.

- Au cours des saisons **2020-21, 2021-22, 2022-23** et **2023-24**, les **coûts de production, la consommation d'énergie, d'eau, d'engrais et de produits phytosanitaires** ont été mesurés pour les **serres non chauffées de type Almería** et les **serres multichapelles de l'Université d'Almería** pour la culture de **tomates, de poivrons** et de **concombres**.
- Le **coût de la production de tomates** dans des **serres multichamps non chauffées** en **Italie** a été calculé à partir de données gouvernementales (**Istituto di Servizi per il Mercato Agricolo Alimentare - ISMEA**). La **consommation d'énergie et d'eau** a été mesurée par **Sfera Agricola** dans une **serre commerciale multichamps chauffée**, et les coûts de production associés ont été estimés.
- Une **analyse d'impact du cycle de vie (LCIA)** a été développée, dans laquelle les principaux facteurs d'impact environnemental ont été estimés pour les **cinq études de cas** à l'aide du **modèle de simulation environnementale EXCEL EUPHOROS**.

L'étude de cas a analysé les principaux paramètres climatiques qui influencent le développement des cultures sous serre. L'installation d'un système de climatisation avec des fluides thermochimiques peut contribuer à maintenir une température et une humidité adéquates, à absorber le CO₂ de l'environnement extérieur et à obtenir une plus grande homogénéité de ces paramètres climatiques. Lors de la conception du système de distribution d'air, il convient d'éviter toute perte de rayonnement au niveau des plantes en raison de l'ombrage.

Conditions climatiques analysées pour la culture en serre :

- Températures adéquates de l'air, des feuilles et du sol.
- Humidité relative modérée pour éviter la condensation ou le stress hydrique.
 - Teneur élevée en rayonnement photosynthétiquement actif (PAR).
 - La concentration de CO₂ dans l'air extérieur est de 420 ppm.
 - uniformité des différents paramètres climatiques.

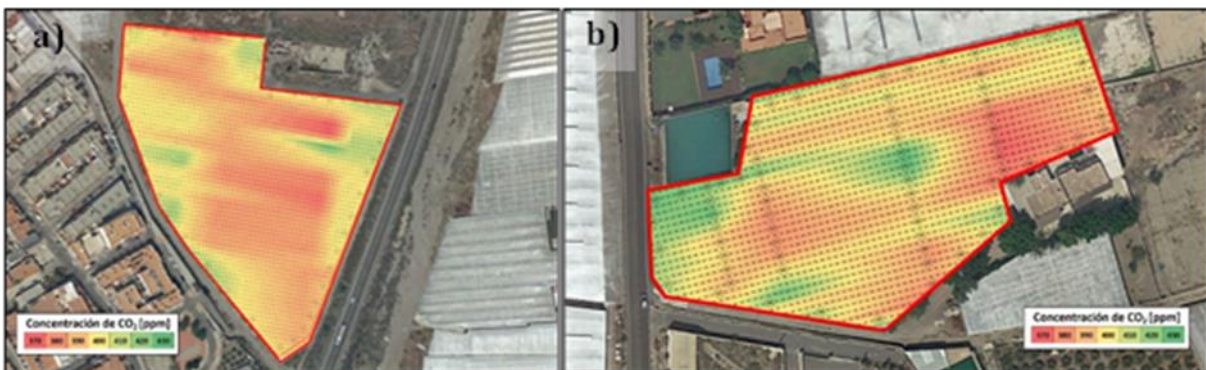


Figure 43. Répartition du CO₂ dans les serres solaires d'Almería de type "raspa y amagado". ou simple (a) et "parral plano" ou élémentaire (b)..

Bien qu'il existe plusieurs possibilités de climatisation efficace dans les serres, les systèmes actifs nécessitent une consommation d'énergie élevée et les systèmes passifs sont souvent limités par les conditions météorologiques extérieures. L'utilisation de fluides thermochimiques pourrait être utilisée en complément d'autres systèmes afin de réduire la consommation d'énergie.

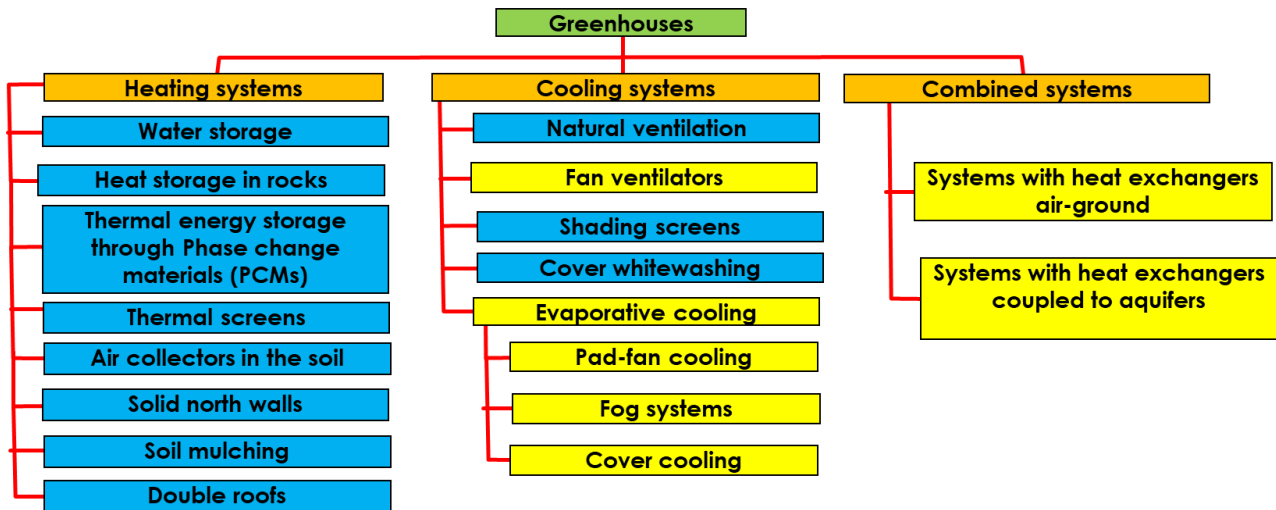


Figure 44. Classification des différents systèmes de climatisation pour les serres - méthodes passives (en bleu).

La consommation d'énergie dans les serres est influencée par les besoins en chauffage. Dans les serres non chauffées, la consommation varie entre 30 et 100 GJ/ha, tandis que dans les serres chauffées, la demande énergétique peut dépasser 20 000 GJ/ha.

Tableau 3. Consommation d'énergie de l'agriculture sous serre dans certains pays européens (plusieurs pays étudiés).

Country	Greenhouse area (ha)	Energy (GJ/ha)		Total energy		Gas emission	
		Heating	Electricity	(GJ/ha)	(kWh/m ²)	(toe/ha) ^b	(tCO ₂ eq/ha) ^c
Spain	77 923	81 – 16 272	2.8	84 – 17 784	2.3 – 158	2.0 – 332.0	13.6 – 1 277
Italy	35 229	11.8 – 9 450	13.5 – 65.6	62 – 14 616	1.7 – 406	3.0 – 349	11.6 – 1 344
Netherland	10 636	10 303 – 14 990	1 300	11 603 – 22 689	325 – 630	277 – 365	1 389 – 1 820
France	9 813	180 – 11 412	158 – 5 976	6 156 – 11 412	171 – 317	45 – 273	354 – 1 049
Greece	5 100	56 – 8 138	1.1	57 – 8 550	1.6 – 237	1.4 – 204	9 – 786
Germany	3 199	12 612 – 13 000	-	3 981 – 16 308	111 – 453	302 – 390	1 163 – 1 499
Portugal	1 010	2 174 – 6 768	-	273 – 11 556	7.6	6.5	25
Total/Average	120 930	39 020 571	3 871 189	1 562	155	1 717	48

^a 1 GWh = 8.60x10⁻⁵ Mtoe - Mega tonne oil equivalent (Krey et al., 2014).

^b Using a factor emission of CO₂ for heat production of 0.331 tCO₂eq/MWh (Krey et al., 2014).

Alors qu'en Espagne, la surface des cultures protégées a été réduite jusqu'à 18,7 %, la superficie des serres en Italie est restée très stable.

Tableau 4. Superficie des serres et des cultures maraîchères dans les différentes régions d'Espagne et d'Italie.

Evolution of surface of greenhouses in different regions of Spain (MAPA, 2024).

Year	Andalucía	Murcia	Canary Islands	Spain
2016	48 509	6 235	6 744	65 674
2020	55 138	6 491	5 491	71 783
2023	61 099	6 449	5 495	77 923

+18.7%

Evolution of greenhouse surface in different regions of Italy (ISTAT, 2024).

Year	Lazio	Campania	Sicilia	Veneto	Lombardia	Italy
2016	7 845	10 332	7 676	3 360	2 076	35 574
2020	9 001	9 994	7 121	3 285	1 949	35 574
2023	7 629	7 523	7 029	3 748	3 642	35 229

-0.9%

Les prix des produits horticoles varient en fonction des conditions météorologiques en Europe ou de facteurs influençant le marketing (COVID, guerre en Ukraine). Les prix les plus élevés ont été enregistrés en 2023 en Espagne et en Italie. En général, les prix de vente en Italie entre 15 et 20 % plus élevé.

Tableau 5. prix moyen [€/kg] obtenu par les agriculteurs en Espagne et en Italie pour la production sous serre au cours des dernières saisons (JA, 2024a ; ISMEA, 2024a).

Country	Spain				Italy			
	2016/17	2018/19	2020/21	2022/23	2017	2019	2021	2023
Standard tomato	0.66	0.61	0.60	0.94	0.93	0.83	0.93	1.21
Cherry tomato	1.28	1.12	1.23	1.56	1.57	1.12	1.21	1.64
Pepper	0.91	0.77	0.84	1.23	0.74	0.88	1.00	1.51
Cucumber	0.70	0.53	0.57	0.95	0.42	0.48	0.54	0.74
Watermelon	0.35	0.30	0.31	0.40	0.21	0.34	0.25	0.48
Zucchini	0.68	0.54	0.50	0.67	0.93	0.97	1.12	1.16
Melon	0.41	0.48	0.40	0.49	0.52	0.65	0.61	1.05
Eggplant	0.73	0.60	0.55	0.74	0.63	0.71	0.86	1.02
Bean	1.69	1.83	1.63	2.26	1.84	1.63	2.90	0.80
Average	0.63	0.65	0.63	0.90	0.76	0.78	0.86	1.05

Pour chacune des cinq études de cas sélectionnées, les coûts de production, la consommation d'eau et d'énergie ainsi que leur impact environnemental ont été analysés. Les résultats sont présentés ci-dessous pour chacun des cinq cas analysés.

3.2. Étude de cas 1 – Serre non chauffée de type Almería

Le premier cas analysé est celui des serres de type Almería, qui représentent plus de 70 % de la production espagnole par an. Les coûts d'investissement s'élèvent à 15-20 €/m².

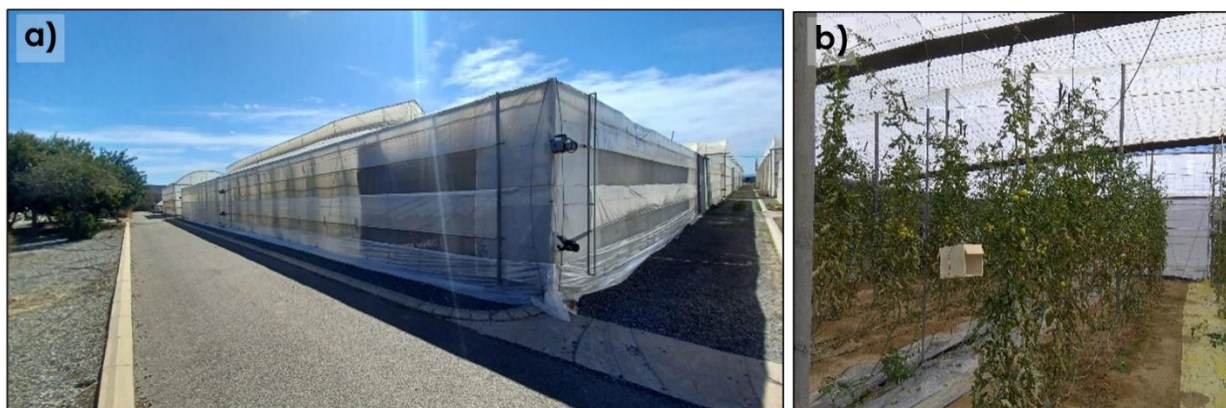


Figure 45. : Serre de type Almería (a) et récolte de tomates à l'intérieur (b) dans la station expérimentale UAL-ANECOOP à Almería (Espagne).

Ces serres atteignent des niveaux de productivité généralement inférieurs à 15 kg/m² et des coûts de production de 0,7 à 1,0 €/kg. En fonction des prix de l'année, les agriculteurs peuvent réaliser un bénéfice allant jusqu'à 50.000 €/ha ou subir des pertes.

Tableau 6. Coûts de production mesurés pour les tomates cultivées au cours des saisons 2017/18 (coûts mis à jour pour la saison 2022/23) et 2023/24 dans une serre de type Almería située à l'Université de la ferme expérimentale d'Almería-ANECOOP.

Greenhouse type	Almería-type in "Raspa y amagado"				
Farm area [m ²]	28 152	Greenhouse surface [m ²]	1 917		
Commercial type	On vine or branch		Tomato Pears		
Cycle length [days]	225		194		
Type of soil	Sand mulching		Coconut fiber substrate		
Average marketable yield Y _{CS} [kg/m ²]	10.8		6.6		
Type of cost	€/ha				
Supplies	24 823		19 127		
Transport	2 181		1 153		
Labour	30 675		24 206		
Contracted external services	1 224		508		
Total variable or direct costs, C _V [€/ha]	58 903		44 994		
Investment cost [€/m ²]	Amortization [€/ha]	17.8	17 070	18.4	17 668
Total fixed or indirect costs C _F [€/ha]	17 743		20 995		
Total cost [€/ha]	76 645		65 990		
Unitary cost [€/kg]	0.71		1.00		
Average price A _p [€/kg]	1.03		0.94		
Total value crop [€/m ²]	11.12		6.21		
Production value P_V [€/ha]	111 240		62 111		
Annual operating income I _y [€/ha]	34 595		-3 879		

Ces serres sont celles qui consomment le moins d'énergie, notamment dans le système d'irrigation et lors de l'ouverture et de la fermeture des fenêtres (si elles sont motorisées). La consommation d'énergie électrique varie de 1 à 1,5 kWh/m² et la consommation d'eau de 15 à 75 l/m².

Tableau 7. Consommation d'énergie et d'eau mesurée dans la serre expérimentale non chauffée de type Almería de l'Université d'Almería.

Season	2020-21	2021-22	2022-23	2023-24
Crops	Cucumber+tomato	Cucumber+pepper	Tomato+zucchini	Tomato
Energy consumption				
Electricity price [€/kWh]	0.145	0.159	0.143	0.132
Electricity for ventilation [kWh/m ²]	0.398	0.379	0.452	0.230
Total electricity [kWh/m ²]	1.194	1.064	1.442	0.924
Electrical consumption [GJ/ha]	43.0	38.3	51.9	33.3
Water consumption				
Water consumption [m ³ /ha]	2 185	5 242	4 854	2 945
Water price [€/m ³]	0.54	0.76	1.06	1.23
Water requirements [m³/t]	14.3	63.5	73.8	61.6

C'est dans ces serres que l'on obtient l'impact environnemental le plus faible. La structure de la serre et le système d'irrigation ont l'impact le plus important. Les valeurs calculées pour les deux cultures de tomates cultivées dans les serres UAL sont similaires aux valeurs publiées, avec des émissions comprises entre 95 et 280 kg de CO₂ eq/t. Les valeurs calculées pour les deux cultures de tomates sont plus élevées que les valeurs publiées.

Tableau 8. Facteurs environnementaux totaux fournis par le modèle de simulation EXCEL EUPHOROS (Torrellas et al., 2013) pour les cultures de tomates dans des serres non chauffées de type Almería de

l'Université d'Almería (UAL), et évalués par Martin-Gorriç et al., 2011 (MG) et par García Martínez, 2019 (GM) d'après les résultats de l'étude de l'Université d'Almería (1 tonne de tomates commercialisables).

Crops	UAL 2017-18	UAL 2023-24	MG 2011	GM 2019
Yield [kg m ⁻²]	10.80	6.61	5.13	10.00
ADP - Abiotic depletion [kg Sb eq/tn]	1.66	2.00	0.01	0.79
AAP - Air acidification [kg SO ₂ eq/tn]	1.05	1.20	1.75	0.68
EUP - Eutrophication [kg PO ₄ eq/tn]	0.35	0.42	2.70	0.25
GWP - Global warming [kg CO ₂ eq/tn]	208.79	248.18	276.8	94.4
POP - Photochemical oxidation [kg C ₂ H ₄ /tn]	0.05	0.06	-	0.03
CED - Cumulative energy demand [MJ/tn]	4 346	5 210	2 242	1 725
Water consumption [m ³ /tn]	30.17	33.86	38.00	44.80

3.3. Étude de cas 2 – Serres multichapelles non chauffées en Espagne

Les serres multichapelles non chauffées représentent environ 2 % de la superficie des serres en Espagne. Le coût de ce type de serres varie entre 25 et 38 €/m².



Figure 46. Serre multichapelles non chauffée (a) et récolte de tomates à l'intérieur (b) dans la station expérimentale UAL- ANECOOP d'Almería (Espagne).

Dans ces serres, il est possible d'obtenir des productions supérieures à 15 kg/m², selon la combinaison des cultures. Les coûts de production varient entre 0,5 et 1,5 €/kg, ce qui correspond à 50-100 milliers d'€/ha. Des coûts d'investissement plus élevés rendent difficile la réalisation de bénéfices lorsque les produits sont vendus au prix moyen. Normalement, les agriculteurs utilisant ce type de serres ont tendance à obtenir de meilleurs prix de vente grâce à des contrats directs avec des distributeurs.

Tableau 9. Coûts de production pour les saisons 2020/21 - 2023/24 pour les cultures cultivées dans les zones non chauffées. Les plantes sont cultivées dans des serres expérimentales multichapelles à la ferme expérimentale UAL-ANECOOP.

Season	2020-21	2021-22	2022-23	2023-24
Crops	Cucumber+tomato	Cucumber+pepper	Tomato+zucchini	Tomato
Greenhouse surface [m ²]	1 080	1 080	1 080	2 970
Days of crop	259	247	294	174
Marketable yield, Y _C [kg/m ²]	15.3	8.25	6.58	4.78
Supplies	26 791	24 323	36 802	17 163
Transport	5 096	3 654	8 303	2 307
Labour	27 161	26 232	34 147	18 141
External services	1 640	147	677	508
Total variable or direct costs, C _V [€/ha]	60 688	54 357	79 929	38 119
Total investement cost, C _I [€/m ²]	34.0	35.8	37.6	22.9
Amortization costs, C _A =C _I /N _V [€/ha]	19 374	20 558	21 566	13 172
Total fixed or indirect costs, C _F [€/ha]	20 014	22 018	22 699	15 816
Total cost, T _C [€/ha]	80 702	76 375	102 628	53 936
Unitary cost, U _C =T _C /Y _C [€/kg]	0.53	0.93	1.56	1.13
Average price, A _P [€/kg]	0.58	0.81	1.35	1.14
Total value crop, P _V =A _P ·Y _C [€/m ²]	8.89	6.68	8.87	5.45
Revenue of production, P _V =A _P ·Y _C [€/ha]	88 896	66 752	88 733	54 492
Annual operating income, I _V =P _V -T _C [€/ha]	8 194	-9 623	-13 895	556

La consommation d'énergie électrique est similaire à celle du type Almería et varie de 1 à 1,5 kWh/m² et la consommation d'eau varie de 15 à 75 l/m².

Tableau 10. Consommation d'énergie et d'eau mesurée dans des bâtiments expérimentaux non chauffés. Serres multichapelles de l'Université d'Almería.

Crops	Tomato 2022-23	Tomato 2023-24
Energy consumption		
Electricity price [€/kWh]	0.143	0.132
Ventilation electrical consumption [kWh/m ²]	0.350	0.411
Total electrical consumption [kWh/m ²]	1.576	1.053
Electrical consumption [GJ/ha]	56.7	37.9
Water consumption		
Water consumption [m ³ /ha]	3 258	2 238
Water price [€/m ³]	1.06	1.23
Water requirements [m ³ /t]	30.2	33.9

En ce qui concerne le type Almería, la structure de la serre et le système d'irrigation ont l'impact le plus important. En raison de l'utilisation accrue de métal dans la construction de la serre, l'impact est généralement plus élevé que dans le premier cas, avec des émissions comprises entre 150 et 1 000 kg eq CO₂/tonne.

Tableau 11. Facteurs totaux d'impact environnemental calculés à l'aide du modèle de simulation EXCEL EUPHOROS (Torrellas et al., 2013) pour les cultures de tomates dans des serres multichapelles non chauffées de l'Université Almería (UAL) et par Martínez-Blanco et al., 2011 (MB) et Torrellas et al., 2012 (TR). Unité fonctionnelle (1 tonne de tomates commercialisables).

Crops	UAL 2020-21	UAL 2022-23	UAL 2023-24	MB 2011	TR 2012
Yield [kg m ⁻²]	6.19	5.73	4.78	15.90	16.50
ADP - Abiotic depletion [kg Sb eq/tn]	7.92	7.60	6.63	1.06	1.26
AAP - Air acidification [kg SO ₂ eq/tn]	6.54	5.95	5.31	0.94	0.92
EUP - Eutrophication [kg PO ₄ eq/tn]	3.71	3.40	3.01	0.35	0.50
GWP - Global warming [kg CO ₂ eq/tn]	998.88	979.70	851.55	153.0	197.8
POP - Photochemical oxidation [kg C ₂ H ₄ /tn]	0.41	0.35	0.31	0.03	0.03
CED - Cumulative energy demand [MJ/tn]	19 678	18 888	16 560	2 554	3 067
Water consumption [m ³ /tn]	16.85	64.28	61.61	39.11	28.78

3.4. Étude de cas 3 – Serres chauffées multichapelles en Espagne

Le dernier cas choisi pour caractériser les serres espagnoles est celui des serres multichapelles chauffées, qui représentent moins de 2% des serres d'Espagne. Le coût de ce type de serre varie de 45 à 58 €/m².

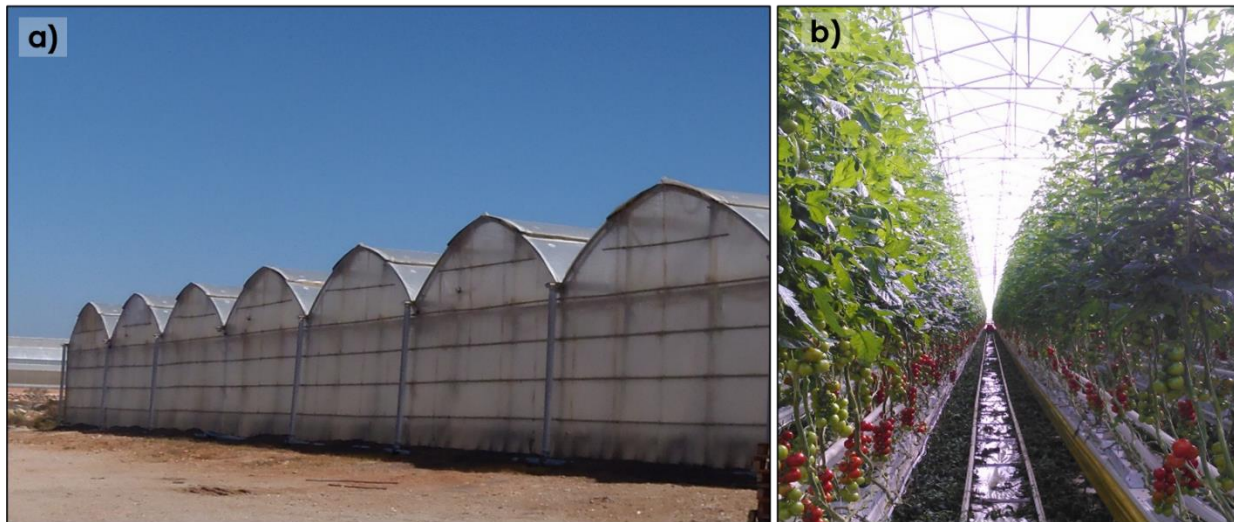


Figure 47. Serre chauffée multichapelles à double couverture (a) et récolte de tomates à l'intérieur (b) de l'entreprise Natural Growers à Almería.

L'utilisation du chauffage permet d'augmenter la productivité à plus de 20 kg/m². Le gaz naturel utilisé pour le chauffage représente le coût de production le plus élevé, soit environ 40 %. En fonction des prix du carburant et des légumes, les agriculteurs peuvent gagner ou perdre de l'argent. Comme dans le cas précédent, il est normal de réaliser des pertes si l'on tient compte du prix de vente moyen. Les agriculteurs concluent généralement des contrats directement avec les chaînes de supermarchés afin de réaliser un bénéfice.

Tableau 12. Actualisation des coûts de production pour la saison 2022/23 des cultures qui ont été cultivées en 2013/14 dans trois régions. Les plantes ont été cultivées dans des serres multichapelles chauffées de l'entreprise Natural Growers à Almería.

Greenhouse type	Plastic multispan with inflated double cover		
Farm area [m ²]	158 140		
Greenhouse surface [m ²]	35 200	11 600	7 200
Crops	Cucumber	Tomato "Cherry"	Tomato "Branch"
Cycle length [days]	280	308	308
Average marketable yield Y_{cs} [kg/m ²]	20.98	8.21	19.79
Type of cost	Subtype of cost	€/ha	
Supplies	107 762	110 164	111 041
Energy for heating	72 792	72 792	72 792
Transport	2 713	1 781	3 896
Labour	39 829	45 168	45 814
External services	1 147	520	1 722
Total variable or direct costs C_v [€/ha]	151 451	157 633	162 473
Investment cost [€/m ²]	52.8	Amortization [€/ha]	27 646
Total fixed or indirect costs C_f [€/ha]	31 210	31 768	30 480
Total cost, T_c [€/ha]	182 661	189 401	192 953
Unitary cost, $U_c=T_c/Y_c$ [€/kg]	0.87	2.31	0.98
Average price, A_p [€/kg]	0.88	1.66	0.97
Total value crop, $P_v=A_p \cdot Y_c$ [€/m ²]	18.40	13.63	19.16
Revenue of production, $P_v=A_p \cdot Y_c$ [€/ha]	184 048	136 341	191 648
Annual operating income, $I_v=P_v-T_c$ [€/ha]	1 387	-53 059	-1 305

L'utilisation du chauffage augmente la consommation d'énergie à plus de 120 kWh/m². La consommation d'eau peut également augmenter en raison de la transpiration plus importante de la récolte, avec des valeurs de 60 à 150 l/kg.

Tableau 13. La consommation d'énergie et d'eau est mesurée dans trois serres chauffées à plusieurs dômes de l'entreprise Natural Growers à Almería, dont les prix ont été mis à jour pour la saison 2022/23.

Crop	Cucumber	Tomato "Cherry"	Tomato "Branch"
Energy consumption			
Electricity price [€/kWh]	0.143	0.143	0.143
Consumption in ventilation [kWh/m ²]	0.242	0.242	0.242
Total electrical consumption [kWh/m ²]	2.800	2.800	2.800
Electrical consumption [GJ/ha]	100.8	100.8	100.8
Natural gas price [€/m ³]	0.607	0.607	0.607
Natural gas consumption [m ³ /m ²]	11.99	11.99	11.99
Heating energy consumption [kWh/m ²]	128.7	128.7	128.7
Heating energy consumption [GJ/ha]	4632	4632	4632
Water consumption			
Water consumption [m ³ /ha]	19 198	11 982	11 982
Water price [€/m ³]	0.75	0.75	0.75
Water requirements [L/kg] or [m ³ /t]	91.5	145.9	60.5

L'utilisation du chauffage augmente aussi considérablement les émissions, qui atteignent des valeurs de 900 à 3500 kg de CO₂ eq/tonne.

Tableau 14. Facteurs totaux d'impact environnemental fournis par le modèle de simulation environnementale EXCEL EUPHOROS (Torrellas et al., 2013) pour les cultures réalisées dans trois serres chauffées multi-champs de l'entreprise Natural Growers (NG) à Almería, avec une culture biologique (sans utilisation d'insecticides ou de fongicides), et évaluées par Pérez Neira et al., 2018 (PN) pour cultures de tomates par unité fonctionnelle (1 tonne de tomates commercialisables) ont été cultivées).

Crops	Cucumber	T. Cherry	T. Branch	PN 2018
Yield [kg m ⁻²]	20.98	8.21	19.79	15.30
ADP - Abiotic depletion [kg Sb eq/tn]	11.83	30.35	12.59	-
AAP - Air acidification [kg SO ₂ eq/tn]	1.45	3.78	1.57	-
EUP - Eutrophication [kg PO ₄ eq/tn]	0.17	0.90	0.23	-
GWP - Global warming [kg CO ₂ eq/tn]	1 389.7	3 568.9	1 481.2	920.0
POP - Photochemical oxidation [kg C ₂ H ₄ /tn]	0.11	0.28	0.11	-
CED - Cumulative energy demand [MJ/tn]	24 927	63 967	26 544	13 140
Water consumption [m ³ /tn]	91.51	145.94	60.55	-

3.5. Étude de cas 4 – Serre multichapelles non chauffée en Italie

Le premier cas sélectionné en Italie est celui des serres à plusieurs travées sans chauffage. Les coûts varient de 20 à 80 €/m².



Figure 48. Serre multichapelle non chauffée (a) et récolte de tomates à l'intérieur (b) en Italie (COSER. 2024; De Marinis, 2023).

Dans ces serres, la production n'est pas très élevée, de sorte que de nombreux agriculteurs optent pour des plantes de haute qualité comme les tomates cerises. Comme dans le cas de l'Espagne, les agriculteurs doivent obtenir des prix de vente plus élevés que la moyenne en raison de l'importance des investissements, afin d'éviter les pertes.

Tableau 15. Coûts de production estimés pour les tomates "Cherry" cultivées dans des serres commerciales multichapelles non chauffées en Italie pour la saison 2022/23 (ISMEA, 2024 a-c).

Greenhouse type	Multispan		
Farm area [m ²]	100 000	Greenhouse surface [m ²]	10 000
Farm type	Average of commercial	Location	Ragusa (Italy)
Crop specifications			
Commercial type	Cherry	Crop type	Grafted
Cycle	6 months	Cycle length	180 days
Average marketable yield Y _{CS} [kg/m ²]	5.55		
Type of cost	€/ha		
Total variable or direct costs, C _V [€/ha]	40 550		
Investment cost [€/m ²]	Amortization [€/ha]	25.5	22 462
Total fixed or indirect costs C _F [€/ha]	10 303		
Total cost [€/ha]	108 331		
Unitary cost [€/kg]	1.96		
Average price A _P [€/kg]	1.60		
Total value crop [€/m ²]	8.83		
Production value P _V [€/ha]	88 331		
Annual operating income I _Y [€/ha]	-20 000		

La consommation d'énergie et d'eau est similaire à celle des serres multi-tensions non chauffées en Espagne. Cependant, le coût de l'eau (environ 0,25 €/m³) est beaucoup plus faible qu'à Almería (0,75-1,25 €/m³).

Tableau 16. Estimation de la consommation d'énergie et d'eau pour les serres commerciales multichapelles non chauffées en Italie pour la saison 2022/23.

Energy consumption		Source
Electricity price [€/kWh]	0.210	ARERA (2023)
Total electrical consumption [kWh/m ²]	1.9	Estimated from ISMEA (2024 a)
Electrical consumption [GJ/ha]	67	Calculated
Water consumption		
Water consumption [m ³ /ha]	4 570	Bacci et al. (2005)
Water price [€/m ³]	0.25	CBTC, 2024
Water requirements [m ³ /t]	82.7	Calculated

La structure métallique des serres multichapelles génère des émissions entre 750-1200 kg CO₂ eq/t.

Tableau 17. Facteurs d'impact environnemental total fournis par le modèle de simulation environnementale EXCEL EUPHOROS (Torrellas et al., 2013) pour les tomates "cerise" cultivées dans des

serres multichapelles non chauffées en Italie, et calculés par Cellura et al., 2012 (CL) par unité fonctionnelle (1 tonne de tomates commercialisables).

Crops	Tomato "Cherry" 2022-23	CL - Tomato	CL - Tomato "Cherry"
Yield [kg m ⁻²]	5.53	-	-
ADP - Abiotic depletion [kg Sb eq/tn]	5.73	-	-
AAP - Air acidification [kg SO ₂ eq/tn]	4.71	5.70	9.80
EUP - Eutrophication [kg PO ₄ eq/tn]	3.52	2.10	3.70
GWP - Global warming [kg CO ₂ eq/tn]	868.8	740.0	1 245.9
POP - Photochemical oxidation [kg C ₂ H ₄ /tn]	0.21	0.30	0.50
CED - Cumulative energy demand [MJ/tn]	14 141	16 200	23 000
Water consumption [m ³ /tn]	82.64	88.90	77.70

3.6. Étude de cas 5 – Serres chauffées high-tech à plusieurs travées en Italie

Le dernier cas sélectionné correspond à des serres chauffées en Italie avec un niveau de technologie élevé pour les systèmes de climatisation. Les coûts de ces serres sont les plus élevés, avec des valeurs de 70 à 160 €/m².



Figure 49. Serre multichamps chauffée (a) et récolte de tomates dans un substrat avec des tuyaux de chauffage (b) de Sfera Agricola en Italie.

Dans ces serres, les coûts énergétiques liés au chauffage représentent entre 20 et 40 % des coûts totaux. Le chauffage permet d'augmenter la production de plus de 50 kg/m². Le risque économique est fortement accru, de sorte que les gains comme les pertes peuvent être beaucoup plus importants que dans les serres non chauffées.

Tableau 18. Estimation des coûts de production des tomates "cerise" cultivées dans des serres commerciales multichapelles de haute technologie en Italie, chauffées au gaz naturel pendant les saisons

2013/14 (coûts fournis par Battistel, 2014 mis à jour pour la saison 2022/23) et chauffées au diesel et aux granulés de bois pendant les saisons 2022/23 (énergie mesurée par Sfera Agricola).

Greenhouse type	Heated multispans high-tech		
Greenhouse surface [m ²]	50 000	119 232	
Cycle length [days]	320	343	
Average marketable yield Y _{CS} [kg/m ²]	50.0	15.0	
Type of cost	€/ha		
Supplies	365 387	117 094	
Heating energy consumption - gas	245 000	0	
Heating energy consumption - diesel fuel	0	36 068	
Heating energy consumption - wood	0	47 325	
Transport	11 275	3 383	
Labour	149 940	44 982	
External services	47 200	0	
Total variable or direct costs, C _v [€/ha]	573 802	165 459	
Investment cost [€/m ²]	Amortization [€/ha]	74.8	46 607
Total fixed or indirect costs C _f [€/ha]	42 000	26 000	
Total cost [€/ha]	662 409	238 066	
Unitary cost [€/kg]	1.32	1.59	
Average price A _p [€/kg]	1.65	1.65	
Total value crop [€/m ²]	82.7	24.8	
Production value P _v [€/ha]	826 500	247 950	
Annual operating income I _y [€/ha]	164 091	9 884	

La consommation d'énergie pour le chauffage est beaucoup plus élevée dans ces serres, entre 9000 et 13000 GJ/ha, qu'à Almería, où le climat est plus tempéré.

Tableau 19. Estimation de la consommation d'énergie et d'eau pour un système commercial de haute technologie à plusieurs champs. Serre chauffée au gaz naturel et mesurée dans une serre chauffée au diesel et aux granulés de bois (par Sfera Agricola) en Italie pour la saison 2022/23.

Heating energy source	Natural gas	References	Diesel and wood pellets
Energy consumption			
Electricity price [€/kWh]	0.276	ARERA (2023)	0.210
Total electrical consumption [kWh/m ²]	15.0	Battistel (2014)	11.4
Electrical consumption [GJ/ha]	540	Calculated	410
Natural gas price [€/m ³]	0.980	ARERA (2023)	-
Natural gas consumption [m ³ /m ²]	25.0	Battistel (2014)	-
Diesel fuel price [€/m ³]	-	-	1.050
Diesel fuel consumption [L/m ²]	-	-	3.44
Wood price [€/tons]	-	-	75.0
Wood consumption [kg/m ²]	-	-	63.1
Heating energy consumption [kWh/m ²]	270.8	Calculated	350.9
Heating energy consumption [GJ/ha]	9 747	Calculated	12 631
Water consumption			
Water consumption [m ³ /ha]	10 000	Battistel (2014)	300
Water price [€/m ³]	0.25	CBTC (2024)	0.25
Water requirements [m ³ /t]	20.0	Calculated	2.0

Ces serres génèrent des émissions plus élevées, de l'ordre de 1400 kg de CO₂ eq/tonne.

Tableau 20. Facteurs d'impact environnemental totaux fournis par le modèle de simulation environnementale EXCEL EUPHOROS (Torrellas et al., 2013) pour les "tomates cerises" cultivées dans des serres commerciales high-tech multichapelles, chauffées au gaz naturel et alimentées en diesel et en

granulés de bois, en Italie pour la saison 2022/23 par unité fonctionnelle (1 tonne de tomates commercialisables).

Heating source	Natural gas	Diesel and wood pellets
Yield [kg m ⁻²]	50.00	15.00
ADP - Abiotic depletion [kg Sb eq/tn]	11.79	9.72
AAP - Air acidification [kg SO ₂ eq/tn]	2.50	5.16
EUP - Eutrophication [kg PO ₄ eq/tn]	1.16	2.01
GWP - Global warming [kg CO ₂ eq/tn]	1 444.0	1 415.6
POP - Photochemical oxidation [kg C ₂ H ₄ /tn]	0.15	0.24
CED - Cumulative energy demand [MJ/tn]	25 552	24 120
Water consumption [m ³ /tn]	20.00	2.00

3.7. Conclusions

Dans des serres chauffées en Espagne et en Italie, des liquides thermochimiques pourraient être utilisés pour réduire les coûts de chauffage et leur impact sur l'environnement.

Le système de climatisation basé sur des fluides thermochimiques pourrait être utilisé dans des serres multichapelles non chauffées pour le refroidissement et le contrôle de l'humidité.

Les moyennes et grandes entreprises (20-50 ha) sont les plus aptes à adopter ce type de technologie en Espagne.

Les agriculteurs consultés ont indiqué qu'ils réaliseraient un investissement de 5 000 à 15 000 €/ha avec une rentabilité de 2 à 10 ans.

4. TheGreefa – Impact sur l'environnement et l'économie

La section du manuel de formation TheGreefa se concentre sur la présentation des résultats de l'analyse des impacts environnementaux et économiques liés à l'implémentation de la technologie TheGreefa dans les serres. La principale technologie analysée est le système de contrôle du climat intérieur pour les applications de serre.

4.1. Impact sur l'environnement

Dans le projet TheGreefa, les avantages environnementaux potentiels liés à la mise en œuvre de la technologie TheGreefa dans les serres ont été identifiés dans l'analyse du cycle de vie réalisée dans le cadre du work package 3 du projet, en se concentrant sur l'évaluation des technologies développées.

L'étude a été réalisée conformément aux principes et au cadre de l'ACV définis dans la norme internationale sur l'ACV, ISO 14040 et ISO 14044.

Les données des démonstrateurs TheGreefa et des études de cas ont été collectées et analysées en termes d'énergie, d'eau, de consommation de combustibles fossiles et de production des serres, afin de comparer les impacts environnementaux avant et après la mise en œuvre du système TheGreefa, sur la base de données réelles (démonstrateurs) ou de simulations (études de cas). L'étude ACV permet d'analyser l'efficacité globale à long terme de la technologie TheGreefa et de montrer comment elle peut avoir un impact positif sur l'environnement et les personnes.

L'ACV a été réalisée à partir de données réelles provenant de serres TheGreefa situées dans la zone climatique continentale moyenne (Suisse) et dans la zone climatique méditerranéenne (Italie, Toscane).

Méthodologie de l'ACV

Il existe quatre étapes différentes dans une étude ACV, décrites dans les normes ISO mentionnées.

La première est de définir l'objectif et la portée de l'étude afin de s'assurer que l'analyse du cycle de vie soit effectuée de manière cohérente

- L'ACV modélise le cycle de vie d'un produit, d'un service ou d'un système. Un modèle est une simplification d'une réalité complexe et, comme pour toute simplification, cela signifie que la réalité est déformée d'une manière ou d'une autre. Le défi pour un praticien de l'ACV est de s'assurer que les simplifications et les distorsions n'affectent pas trop les résultats. La meilleure façon d'y parvenir est de définir soigneusement l'objectif et la portée de l'étude ACV.

Nous pouvons alors passer à la 2e étape, l'analyse de l'inventaire des extractions et des émissions.

- L'analyse de l'inventaire considère toutes les entrées et sorties environnementales associées à un produit ou à un service. Un exemple d'apport environnemental, quelque chose qui est prélevé dans l'environnement pour être intégré dans le cycle de vie du produit, est l'utilisation de matières premières et d'énergie. Les impacts environnementaux émis dans l'environnement au cours du cycle de vie du produit incluent les émissions de polluants et les flux de déchets. Ensemble, ils donnent une image complète du cycle de vie du produit ou du processus.

Une fois l'inventaire terminé, nous pouvons passer à l'étape de l'évaluation de l'impact du cycle de vie.

- L'analyse du cycle de vie (ACV) permet de tirer les conclusions qui permettront de prendre de meilleures décisions d'entreprise. Les impacts environnementaux sont classés et évalués en fonction de ce qui est le plus important pour une entreprise et traduits en termes environnementaux tels que le réchauffement climatique ou la santé humaine. La décision la plus importante à prendre est de savoir à quel point les résultats doivent être intégrés. Il est possible de créer un score unique pour montrer à quel point le produit est durable ou pour voir si la conception améliore les émissions de CO2 et d'autres facteurs de changement climatique. Cela dépend généralement du type de public auquel on s'adresse et de la capacité de l'auditoire à comprendre des résultats détaillés.

La dernière - 4ème étape consiste à interpréter les résultats obtenus à l'étape précédente.

- Pendant la phase d'interprétation, on vérifie que les conclusions sont bien fondées. La norme ISO 14044 décrit plusieurs tests pour vérifier si les conclusions sont correctement étayées par les données et les procédures utilisées.

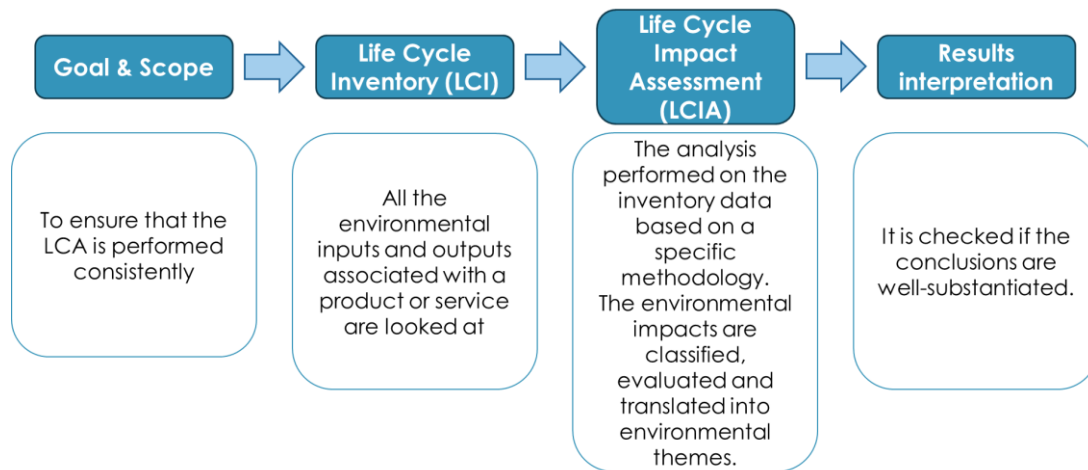


Figure 50. Quatre étapes pour réaliser une analyse du cycle de vie.

Pour le projet TheGreefa, l'objectif de l'étude ACV était d'analyser et de comparer l'impact environnemental résultant de 15 années d'exploitation des serres, en tenant compte de la serre avant et après la mise en œuvre du système de contrôle climatique de TheGreefa.

LCA boundaries		Life cycle stages	Life cycle stage designation and description
Cradle to cradle (C2C)	Cradle to grave (C2G)	Product stage	A1 Raw material extraction and processing, processing of secondary material input
			A2 Transport to the manufacturer
			A3 Manufacturing
		Installation process stage	A4 Transport to the Building site
			A5 Installation into the Building site
	Gate to grave	Use stage – information modules related to the Product/Material	B1 Use or application of the installed product
			B2 Maintenance
			B3 Repair
		Use stage – information modules related to the operation of the Customer site	B4 Replacement
			B5 Refurbishment
End-of-life stage	B6 Operational energy use		
	B7 Operational water use		
	C1 Deconstruction, demolition		
	C2 Transport to waste processing		
Benefits and loads beyond the system boundary		C3 Waste processing for reuse, recovery and/or recycling (3R)	
		C4 Disposal	
		D Reuse, recovery and/or recycling (3R) potentials	

Figure 51. Phases du cycle de vie d'un produit ou d'un service.

Il faut ensuite définir les limites de l'analyse. Le tableau présente les limites incluant toutes les phases du cycle de vie du produit ou du service. Depuis l'extraction des matières premières jusqu'au stockage final ou au recyclage des matériaux, en passant par la fabrication, l'utilisation et le démantèlement.

L'analyse porte sur une durée d'exploitation de 15 ans pour chaque serre, pour une surface d'un hectare de la serre. Par conséquent, seule la phase d'exploitation du cycle de vie est prise en compte afin d'identifier et de comparer les impacts. Les différences portent sur la consommation d'énergie et de combustible des systèmes énergétiques des serres pendant leur fonctionnement.

Le logiciel SimaPro a été utilisé pour réaliser l'analyse.

Catégories d'impact

Les normes ISO définissent les catégories d'impact spécifiques qui décrivent les pressions sur l'environnement. Les principales catégories d'impact prises en compte dans l'ACV sont les suivantes :

- **Potentiel de pression abiotique** – fait référence à la consommation de ressources non biologiques telles que les combustibles fossiles, les minéraux, les métaux, l'eau, etc. Il indique la diminution de ces ressources. La catégorie est exprimée en unités MJ pour les combustibles fossiles et en kg d'équivalent antimoine (Sb) pour les autres minéraux.
- **Changement climatique / Potentiel de réchauffement global** – défini comme le changement de la température globale causé par l'effet de serre provoqué par l'émission de "gaz à effet de serre" par les activités humaines.
- **Potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone** – appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique par les émissions anthropiques de substances qui appauvrissent la couche d'ozone. Il peut entraîner une augmentation du rayonnement ultraviolet UV-B et du nombre de cas de maladies de la peau.
- **Potentiel de toxicité pour l'homme** – un indice calculé qui reflète les dommages potentiels d'une unité de produits chimiques libérés dans l'environnement, et qui est basé à la fois sur la toxicité inhérente d'un composé et sur sa dose potentielle. Ces sous-produits, principalement l'arsenic, le bichromate de sodium et les fluorures d'hydrogène, sont en grande partie provoqués par la production d'électricité à partir de sources fossiles.
- **Potentiel d'écotoxicité aquatique pour l'eau douce** – les effets toxiques des substances chimiques sur les écosystèmes, en l'occurrence l'eau douce, qui entraînent une perte de biodiversité et/ou l'extinction d'espèces.
- **Potentiel d'écotoxicité aquatique en mer** – les effets toxiques des produits chimiques sur les écosystèmes des réservoirs marins, entraînant une perte de biodiversité et/ou l'extinction d'espèces.
- **Potentiel d'écotoxicité terrestre** – les effets toxiques des substances chimiques sur les écosystèmes terrestres, entraînant une perte de biodiversité et/ou l'extinction d'espèces.
- **Potentiel d'oxydation photochimique** (Potentiel de formation d'ozone photochimique) – définit le potentiel de formation du type de smog généré par l'exposition à la lumière du

soleil, à la chaleur et aux composés organiques volatils (COVNM) et oxydes d'azote (NO_x).

- **Potentiel d'acidification** – réduction du pH due à l'effet acidifiant des émissions anthropiques. Il est lié aux émissions de gaz tels que NH₃, NO_x et SO_x, qui se mélangent à l'eau dans l'atmosphère et provoquent des pluies acides qui augmentent l'acidité de l'eau et des systèmes de sol.
- **Potentiel d'eutrophisation** – définit le potentiel d'accumulation de nutriments dans les systèmes aquatiques. Les indicateurs d'impact sont l'augmentation de la concentration en azote et en phosphore et la formation de biomasse (par ex. algues).

Analyse du cycle de vie – Serre suisse

La serre Meyer Orchideen est le démonstrateur TheGreefa dans lequel le système a été mis en œuvre et fonctionne à l'échelle réelle. Dans la serre de Meyer Orchideen AG en Suisse, près de l'aéroport de Zurich, le contrôle de l'humidité, le chauffage et le refroidissement de TheGreefa ont été démontrés dans un système par un seul processus.



Figure 52. Serre à orchidées Meyer.

La serre en cours d'analyse a une superficie de 600 m², sur laquelle sont installés 9 climatiseurs (absorbeurs) d'une puissance de 8 kW chacun en tant que puissance de chauffage/refroidissement, chacun alimentant environ 50 m² de tables de plantation.



Figure 53. L'unité d'absorption (à gauche) et les tables de plantation (à droite) dans la serre en Suisse.

Le TCF utilisé dans le projet est le MgCl_2 . Les 9 systèmes sont desservis par un désorbeur installé à l'extérieur de la serre. Les systèmes énergétiques sont intégrés dans le système renouvelable de la serre, y compris la chaudière à bois, la pompe à chaleur sur eau souterraine, les panneaux photovoltaïques et l'eau de puits.

L'énergie solaire est utilisée pour la régénération du TCF et des réservoirs tampons sont installés pour

de stocker du TCF dilué et concentré.

Les données collectées pour l'évaluation environnementale devaient permettre de comparer les effets tels que l'impact environnemental ou l'impact sur la santé humaine entre la serre de 600 m² exploitée sans le système TheGreefa et le système mis en œuvre sur une période de 15 ans. L'analyse a été réalisée pour une unité de référence de 1 ha de la serre analysée. Par conséquent, les entrées collectées ont dû être recalculées pour 1 ha de surface et la période prévue.

L'accent a été mis sur les entrées permettant de comparer l'efficacité énergétique de la serre en tenant compte de l'électricité, de l'eau et des carburants consommés. La majeure partie de l'eau de la serre est utilisée en circuit fermé ou récupérée des pluies. L'eau utilisée pour le processus de refroidissement a été incluse dans l'analyse.

Le Tableau 21 de la diapositive présente les premières données de la Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, à l'aide desquelles l'IZNAB a effectué des calculs supplémentaires, tels que, par exemple, la détermination du poids des carburants, le nombre de transports. Ces données étaient nécessaires pour l'analyse avec le logiciel SimaPro. En plus de la base de données SimaPro, la base de données Ecoinvent a également été utilisée dans l'analyse pour fournir les entrées et sorties nécessaires dans les processus technologiques du cycle de vie de la serre.

Tableau 21. Données sur la consommation d'énergie et de carburant dans les serres suisses.

	1 season for 600 m ² greenhouse		1 season for 1 ha greenhouse	
	Standard greenhouse	TheGreefa system	Standard greenhouse	TheGreefa system
Electricity consumption (pumps, fans and heat pump)	43 178.69 kWh	39 945.54 kWh	719 645 kWh	665 792 kWh
Oil consumption	1 350 kWh	320 kWh	22 500 kWh	5 333 kWh
Wood consumption	228 150 kWh	54 080 kWh	3 802 500 kWh	901 333 kWh
Water consumption	0 m ³	23 m ³	0 m ³	383.3 m ³

Analyse du cycle de vie – Serre italienne

Le cas suivant est le système de serre italien de Sfera Agricola, qui est un système de haute technologie et l'une des nouvelles méthodes de production agricole de qualité. Il réalise une étude de cas sur la récupération de l'eau et l'efficacité énergétique dans les serres. La serre est située dans le sud de la Toscane, en Italie.

L'étude de cas de l'entreprise Sfera est un exemple idéal des défis d'une agriculture méditerranéenne intensive et de haute qualité, notamment dans les domaines importants de l'efficacité de l'eau et de l'énergie. La serre a joué le rôle d'étude de cas dans le cadre du projet TheGreefa. L'objectif des études de cas est d'analyser les données collectées au cours de l'année en fonction des variations climatiques et des besoins culturels de la serre, afin de définir les meilleurs besoins en matière de conception pour réduire davantage les coûts énergétiques et améliorer la qualité et la productivité.

Les données collectées pour l'évaluation environnementale sont les résultats de simulations effectuées par les partenaires du projet TheGreefa. Les données se rapportent à une saison d'exploitation complète sur une surface de serre d'un hectare.

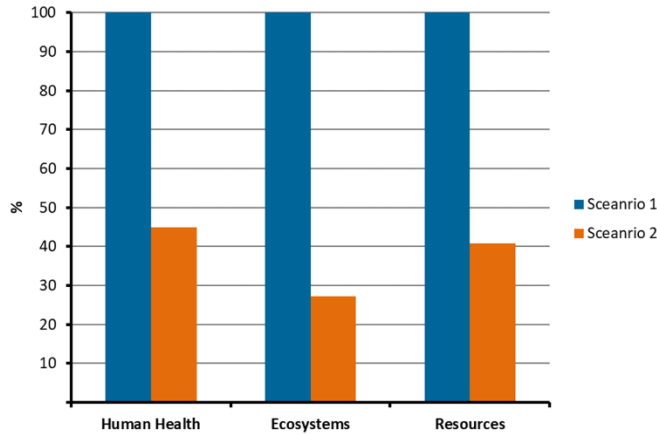


Figure 54. La serre de Sfera Agricola - système de toiture (en haut à gauche), chauffage par tuyauterie (en haut à droite) et les plants de tomates avec capteurs (en bas).

La chaleur dans la serre est fournie par des chaudières à bois et à fioul. Le système a une puissance de 7 000 kW. Les principales essences de bois utilisées comme combustible sont le sapin, le pin, le chêne vert et le châtaignier. La consommation de fioul est d'environ 600 l/h. Le système de chauffage consomme environ 28% de l'électricité consommée par la serre, principalement pour les équipements auxiliaires tels que les pompes.

Tableau 22. Données sur la consommation d'énergie et de carburant collectées dans la serre italienne.

	Standard system	TheGreefa
Heating season	1 year for 1 ha greenhouse	
Electricity	90 330 kWh	99 363 kWh
Oil	34 350 l	27 480 l
Wood	631 t	505 t



œuvre du système TheGreefa.

Analyse du cycle de vie

Les deux serres susmentionnées ont été étudiées en tenant compte de deux scénarios évalués :

- Scénario 1_Serre existante (avant la modernisation). L'analyse du cycle de vie de la serre a été réalisée avant la mise en œuvre du système TheGreefa.
- Scénario 2_Serre Remise à neuf (après la modernisation). L'analyse du cycle de vie de la serre a été réalisée après la mise en

Serre suisse

Tout d'abord, les résultats de l'évaluation de l'impact environnemental de la serre suisse sont présentés. Lorsque le calcul de l'ACV est effectué à l'aide de la méthodologie de base CML-IA, les résultats sont indiqués pour les principales catégories d'impact. Pour chaque catégorie, les impacts positifs de la mise en œuvre du système TheGreefa dans la serre sont observés - inférieurs ou supérieurs. La réduction des impacts lors de l'exploitation du système TheGreefa peut varier de 37 % à 76 %.

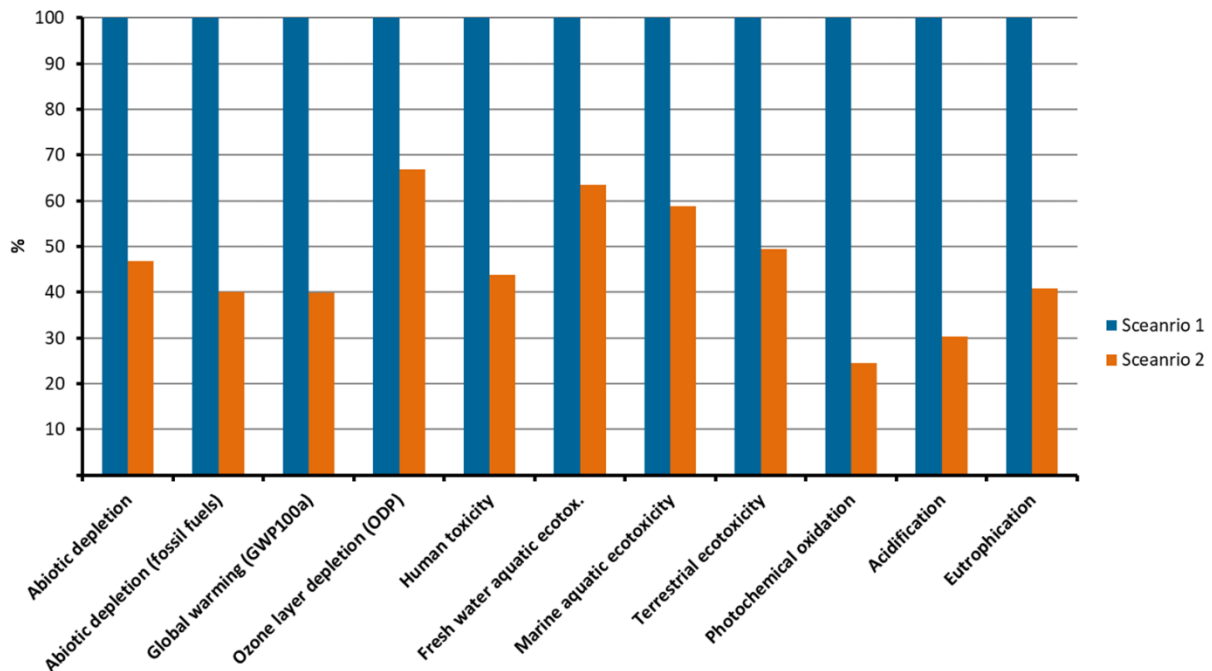


Figure 55. Évaluation environnementale : démonstrateur suisse – comparaison des scénarios 1 & 2 (SimaPro 8.3.0). Méthode : CML-IA Baseline V3.04 / EU25 / Caractérisation pour les catégories d'impact.

Pour une meilleure représentation, une analyse supplémentaire a été réalisée en utilisant la méthodologie européenne ReCiPe pour les points finaux. Elle présente les impacts regroupés en 3 facteurs principaux - santé humaine, écosystèmes et utilisation des ressources.

Sur la base des résultats obtenus, 15 ans d'exploitation du système TheGreefa dans la serre suisse a une réduction de l'impact sur la santé humaine d' environ 55%, une réduction de 60% sur les ressources utilisées et une réduction d'environ 73% des impacts sur les écosystèmes.

Figure 56. Comparaison de l'épreuve d'effort : Serre suisse - Scénario 1 & Scénario 2. Méthode : ReCiPe Endpoom (E) V. 1.13 / Europe ReCiPe E/A

serre sous différentes formes - électricité et chaleur.

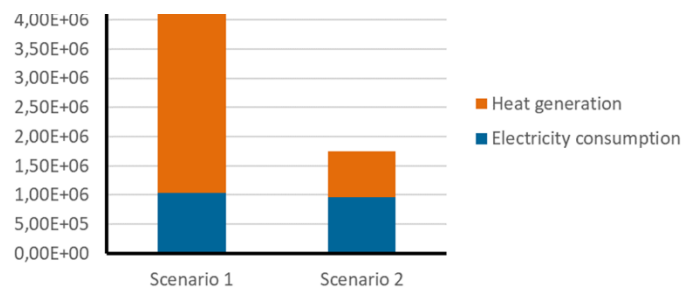
Les phases de fonctionnement comparées pour les deux scénarios et leurs impacts environnementaux sont principalement dominés par l'énergie consommée dans la

Une autre façon de mettre en avant les avantages pour l' environnement, est l'analyse des catégories de potentiel d'effet de serre, exprimées en kilogrammes d'équivalent CO₂. En termes de CO₂, la technologie TheGreefa permettra d'économiser 2 680 tonnes d'émissions de CO₂ sur 1 hectare de serre au cours des 15 ans. Exprimé en pourcentage, cela donne une valeur de réduction du potentiel de réchauffement climatique d'environ 60%. La masse de CO₂ et le pourcentage doivent toutefois permettre de comprendre ce qu'est une culture intensive sous serre industrielle.

Serre italienne

Si nous passons maintenant au cas italien, pour lequel la méthodologie de base CML-IA est utilisée, comme pour le démonstrateur suisse, les effets positifs de l'implémentation du système TheGreefa dans la serre peuvent également être observés dans chaque catégorie pour l'étude de cas italienne. Cependant, dans la serre italienne, la réduction de l'impact est moins visible sur le graphique, car la réduction est comprise entre 10 et 20 % dans chaque catégorie.

Figure 57. Potentiel de réchauffement global (PRG) du Serre suisse dans les deux scénarios.



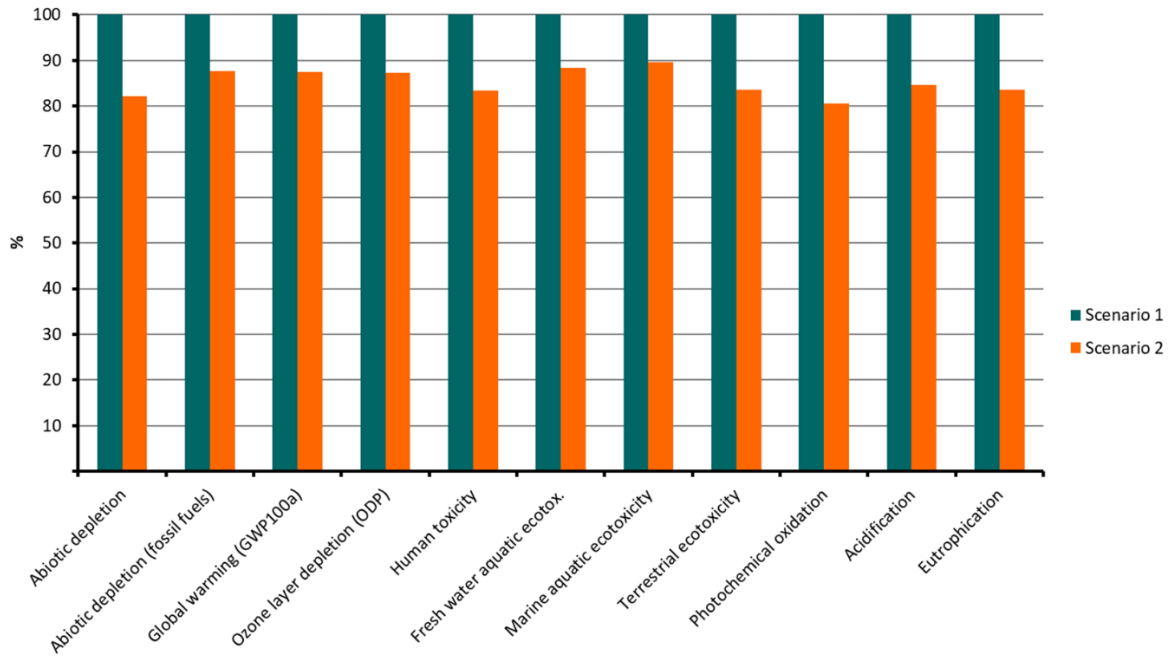


Figure 58. Évaluation environnementale : étude de cas italienne - comparaison des scénarios 1 et 2 (SimaPro 8.3.0). Méthode : CML-IA Baseline V3.04 / EU25.

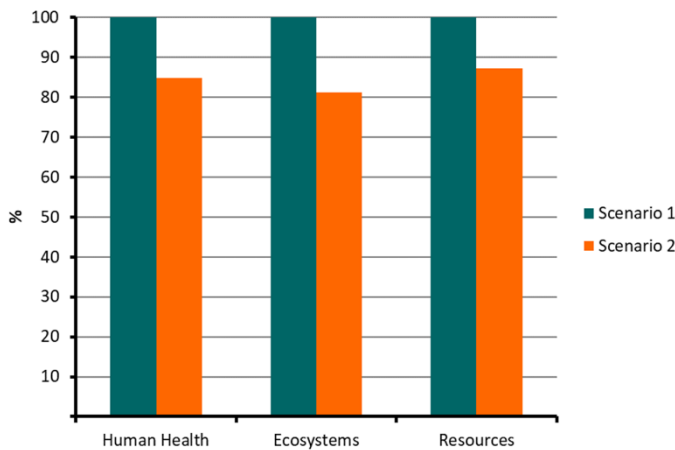


Figure 59. Comparaison de la réduction des dommages : étude de cas italienne - scénarios 1 et 2. Méthode : ReCiPe Endpoom (E) V. 1.13 / Europe ReCiPe E/A.

En utilisant la méthodologie européenne du point final ReCiPe, 15 ans d'exploitation du système TheGreefa dans la serre italienne peuvent entraîner une réduction d'environ 15% des impacts sur la santé humaine, une réduction de 13% en cas d'épuisement des ressources et une réduction d'environ 19% des impacts sur les écosystèmes.

Dans ce cas également, l'impact environnemental est principalement dominé par l'énergie consommée dans la serre sous différentes formes - électricité et chaleur.

En termes d'économie de CO₂, la technologie TheGreefa permettra d'économiser plus de 362 tonnes d'émissions de CO₂ sur 1 ha de serre en 15 ans d'exploitation. En pourcentage, cela représente une réduction de près de 13% du potentiel de réchauffement climatique.

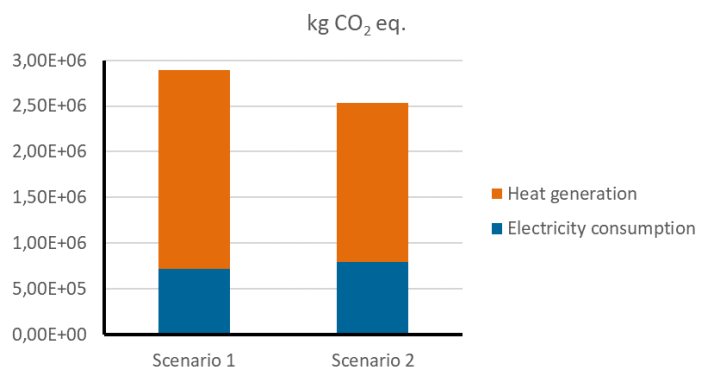


Figure 60. Potentiel de réchauffement global (PRG) de l'étude de cas italienne dans les deux scénarios.

4.2. Importance économique

L'impact économique de TheGreefa a été analysé dans le cadre de l'évaluation technico-économique du système de contrôle du climat intérieur. Cette étude a été réalisée en étroite relation avec l'évaluation environnementale présentée à la section 4.1. L'étude économique a utilisé les mêmes données sur la consommation d'énergie et les combustibles consommés dans les serres TheGreefa, en tenant compte en outre des informations sur les coûts liés à l'énergie et aux combustibles. Les résultats de l'étude devraient être une estimation de la période possible de retour sur investissement pour la mise en œuvre du système TheGreefa, ainsi que des coûts raisonnables du système lui-même, qui offre un retour sur investissement acceptable. Un autre résultat de l'analyse est l'évaluation de la rentabilité de la mise en œuvre du système dans des serres situées dans différentes zones climatiques.

La réalisation de calculs pour une serre pour deux scénarios conduit à des économies de coûts annuels d'une serre lorsque l'exploitation de la serre est comparée avec et sans le système TheGreefa. Afin de comparer les serres du projet, les données collectées ont été traitées pour comparer 1 ha de serres.

La collecte de données était disponible pour un démonstrateur TheGreefa – la serre de Meyer Orchideen en Suisse – et une étude de cas – la serre de tomates de Sfera Agricola en Italie.

Indicateurs de coûts pour l'évaluation économique

Les données environnementales utilisées pour l'étude ont déjà été présentées dans la section précédente. C'est là que les données de coûts ont été collectées.

Serre suisse

L'énergie thermique pour la serre est fournie par une entreprise externe. Le propriétaire de la serre paie le prix de l'énergie fournie comme suit : 96 €/MWh de chaleur provenant du pétrole et 45,12 €/MWh de chaleur provenant du bois. Le coût de l'électricité est de 197,76 €/MWh.

Les données collectées pour l'évaluation devaient permettre de comparer l'impact économique entre la serre de 600 m², exploitée sans le système TheGreefa, et le système mis en œuvre dans une période d'exploitation à long terme. L'analyse a été effectuée à la fois pour la serre de 600 m² et pour une unité de référence de 1 ha de la serre analysée. Par conséquent, les entrées collectées ont dû être recalculées pour 1 ha de surface.

Les coûts d'investissement pour la mise en œuvre du système TheGreefa dans la serre suisse se sont élevés à 153 600 €. Si l'on décompose ces coûts en coûts de matériel et de main-d'œuvre, le rapport est estimé à 50/50. En Suisse, les coûts de main-d'œuvre utilisés dans l'étude s'élèvent à 120 €/heure. Le coût d'investissement correspond à la mise en œuvre du système dans une serre de 600 m².

Tableau 23. Intrants saisonniers pour la serre suisse - 600 m².

	Standard greenhouse	Cost	TheGreefa system	Cost
Electricity consumption (pumps, fans and heat pump)	43,18 MWh	€8 539,02	39,95 MWh	€7 900,03
Oil consumption	1,35 MWh	€129,60	0,32 MWh	€30,72
Wood consumption	228,15 MWh	€10 294,13	54,08 MWh	€2 440,09

 Tableau 24. Coûts de mise en œuvre du système TheGreefa dans la serre suisse de 600 m².

Materials cost	€76 800,00
Labour cost	€76 800,00
Total investment cost	€153 600,00

Afin de pouvoir comparer les résultats de l'étude avec la serre italienne d'un hectare, nous avons calculé, comme nous l'avons déjà mentionné, les coûts et la consommation d'énergie et de combustibles pour un hectare. Ensuite, les coûts d'investissement s'élèvent à 2 560 000 euros.

Tableau 25. Intrants saisonniers pour la serre suisse – 1 ha.

	Standard greenhouse	Cost	TheGreefa system	Cost
Electricity consumption (pumps, fans and heat pump)	719,65 MWh	€142 317,98	665,79 MWh	€131 666,63
Oil consumption	22,50 MWh	€2 160,00	5,33 MWh	€511,68
Wood consumption	3 802,50 MWh	€171 568,80	901,33 MWh	€40 668,01

Tableau 26. Coûts estimés pour la mise en œuvre du système TheGreefa dans une serre suisse d'un hectare.

Materials cost	€1 280 000,00
Labour cost	€1 280 000,00
Total investment cost	€2 560 000,00

Serre italienne

La chaleur dans la serre est fournie par des chaudières à bois et à fioul. Le système a une puissance de 7 000 kW. Les principales essences de bois utilisées comme combustible sont le sapin, le pin, le chêne vert et le châtaignier. La consommation de fioul est d'environ 600 l/h. Le système de chauffage consomme environ 28 % de l'électricité consommée par la serre, principalement pour les équipements auxiliaires tels que les pompes. Le coût unitaire de l'énergie et des combustibles fournis par Sfera est de : 0,22 € par 1 kWh d'électricité, 1,05 € pour 1 litre de pétrole et 75 € pour 1 tonne de bois. Le coût annuel estimé pour le transport de carburant s'élèvent à 5 000 EUR.

Tableau 27. Intrants saisonniers pour la serre italienne – 1 ha.

	Standard system	Cost	TheGreefa system	Cost
Electricity	90 330 kWh	€19 872,60	99 363 kWh	€21 859,86
Oil	34 350 l	€36 067,50	27 480 l	€28 854,00
Wood	631 t	€47 325,00	505 t	€37 860,00

Les coûts d'investissement ont été estimés sur la base des coûts dans les serres suisses. Le même rapport entre les coûts des matériaux et de la main-d'œuvre a été utilisé. En ce qui concerne les coûts de main-d'œuvre, ils sont moins élevés en Italie qu'en Suisse et coûtent 40 €/heure. Les coûts d'investissement pour une serre suisse d'un hectare, soit 2 560 000 €, ont été utilisés comme base de calcul. Le coût de la main-d'œuvre s'élève à environ 426 600 euros. En incluant les matériaux, la valeur totale des coûts d'investissement pour la serre italienne s'élève à 1 706 600 euros.

Tableau 28. Coûts estimés pour l'implémentation du système TheGreefa dans une serre italienne d'un hectare.

Materials cost	€1 280 000,00
Labour cost	€426 000,00
Total investment cost	€1 706 600,00

Évaluation techno-économique

Afin de pouvoir réaliser l'évaluation technico-économique de la mise en œuvre du système TheGreefa, les deux serres ont été analysées selon deux scénarios :

- Système standard – La serre avant la mise en place du système TheGreefa.
- Système TheGreefa – Le fonctionnement de la serre avec le système de climatisation TheGreefa mis en place.

Serre suisse

La simulation de la rentabilité de la période d'investissement a été calculée en tenant compte des coûts annuels de fonctionnement de la serre (systèmes énergétiques) avec le système standard et avec le système TheGreefa. L'économie annuelle calculée est de 8 591,91 €. Sur la base de la simulation et compte tenu du coût d'investissement de 153 600 euros, le retour sur investissement est de 18 ans. Une telle durée est acceptable et attendue à la fois par le propriétaire de la serre Meyer et par l'Office fédéral suisse de l'énergie, qui participe à la démonstration de la serre suisse.

La période de retour sur investissement obtenue est acceptable pour le propriétaire de la serre.

Dans l'étude de marché du projet TheGreefa, il a toutefois été constaté que la période la plus attendue et la plus acceptable pour la plupart des serres est de 7 à 10 ans. La Figure 61 présente les résultats de la simulation, en vérifiant les valeurs des autres coûts d'investissement et leur rentabilité des périodes d'investissement.

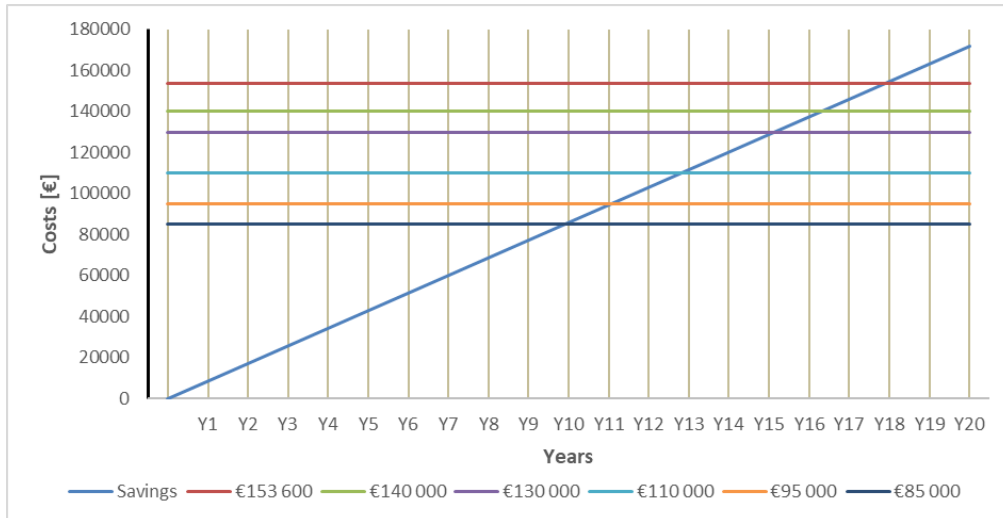


Figure 61. Simulation de la rentabilité de la durée d'investissement pour différents coûts d'investissement - serre suisse de 600 m².

L'objectif est de déterminer quel devrait être le coût d'investissement pour atteindre la fourchette mentionnée de temps attendu pour le rendement de l'investissement. La valeur initiale est de 153 600 € pour une période de 18 ans. En limitant les coûts à 110 000 euros, le retour sur investissement peut être atteint en 13 ans. Cependant, le temps attendu de 10 ans n'est atteint que si les frais sont presque deux fois plus élevés que la valeur initiale (85 000 euros).

A des fins de comparaison, la simulation a également été effectuée pour 1 ha de serre suisse. Les coûts d'investissement estimés pour un tel cas s'élèvent à 2 560 000 EUR. Dans ce cas, la rentabilité de la période d'investissement est également de 18 ans.

Serre italienne

La simulation de la rentabilité de la période d'investissement a été calculée en tenant compte des coûts annuels de fonctionnement de la serre (systèmes énergétiques) avec le système standard et avec le système TheGreefa. L'économie annuelle calculée est de 14 691,24 €. Sur la base de la simulation et en tenant compte des coûts d'investissement de 1 706 600 euros, la rentabilité de la période d'investissement s'étend sur 100 ans. Une période aussi longue est totalement inacceptable et inatteignable dans la vie réelle. La longue période s'explique par les économies de coûts relativement faibles par rapport à la serre suisse analysée précédemment. Dans le cas du système de contrôle du climat intérieur des serres du projet TheGreefa, l'objectif est de réduire les pertes de chaleur et de diminuer la consommation d'électricité et de combustible pour fournir la demande de chaleur de la serre. Plus la demande de chaleur de la serre est élevée, plus les économies résultant de la mise en œuvre du système sont importantes. En analysant des serres suisses et italiennes, il a été constaté que les besoins en chaleur de la serre italienne sont inférieurs de 10 % à ceux de la serre suisse. Cette différence est due à leur situation dans des zones climatiques différentes. Le pourcentage est également visible si l'on considère les économies de coûts. Pour 1 ha de serre en Suisse, l'économie de coûts est de 143 200,46 € par an, alors qu'elle n'est que de 14 691,24 € pour 1 ha de serre italienne.

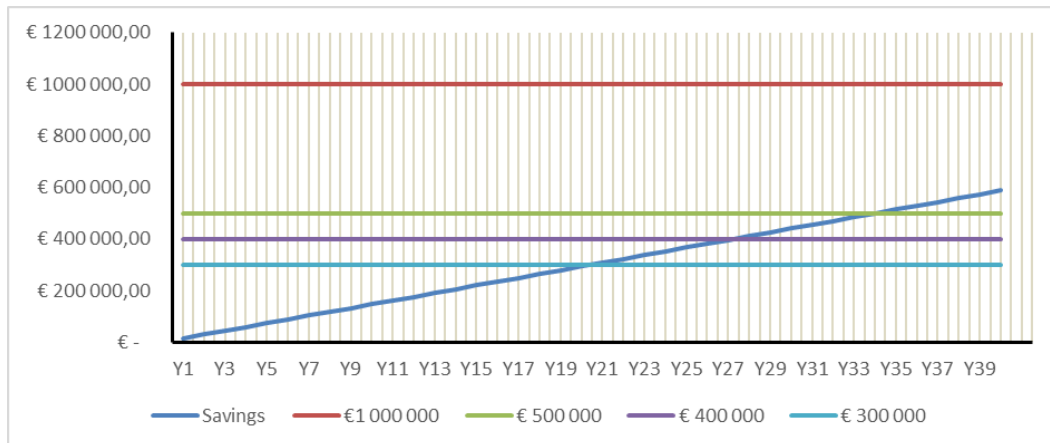


Figure 62. Simulation de la rentabilité de la période d'investissement pour différents coûts d'investissement - 1 ha de serre italienne.

La simulation a également été effectuée afin de voir quel devrait être le coût du système pour obtenir une période de retour sur investissement comparable à celle de la serre suisse. Les résultats présentés dans la Figure 62 montrent que la période de retour sur investissement n'est de 21 ans que si le coût de mise en œuvre du système est de 300 000 euros. Or, à l'heure actuelle, il n'est pas possible d'atteindre de tels coûts pour une serre d'un hectare.

4.3. Conclusions

Les résultats de l'analyse du cycle de vie (ACV) présentés ont montré que l'utilisation de la nouvelle technologie TheGreefa dans les serres contribue à une réduction visible de l'impact environnemental de l'exploitation des serres. Le chauffage, le refroidissement et le contrôle de l'humidité sont des processus très énergivores dans le fonctionnement des serres. La production de chaleur et la consommation d'électricité sont responsables de la majeure partie de l'impact environnemental. La mise en œuvre d'améliorations sur ces aspects est donc la bonne décision, qui peut contribuer à atteindre les objectifs climatiques de l'UE en réduisant la consommation d'électricité et de ressources naturelles.

Outre la réduction des émissions de gaz à effet de serre (économies de CO₂), les avantages de la mise en œuvre du système TheGreefa ne sont pas les seuls. Ils sont responsables du changement climatique. Il existe également d'autres aspects pour lesquels TheGreefa apporte des améliorations à long terme. En réduisant fortement des facteurs tels que la toxicité humaine ou le potentiel d'oxydation photochimique, l'utilisation du nouveau système peut entraîner une réduction de 20 % à plus de 50 % des effets négatifs sur la santé humaine.

La consommation de ressources telles que le bois et le pétrole, voire le gaz naturel, est moindre, mais peut être encore réduite en intégrant davantage de sources d'énergie renouvelables dans les systèmes énergétiques des serres – pompes à chaleur, géothermie et autres.

L'évaluation technico-économique a donné des résultats prometteurs dans le cas de la serre suisse du projet TheGreefa, située dans un climat moyennement continental. Les coûts d'investissement pour la mise en œuvre de la technologie du projet donnent une estimation de rentabilité de la durée d'investissement de 18 ans. Si les coûts de mise en œuvre du système TheGreefa étaient presque deux fois moins élevés (85 000 € pour 600 m² de serre et 1 416 000 € pour 1 ha de serre), cela pourrait conduire à un retour sur investissement de 10 ans ou moins.

En ce qui concerne la serre italienne, l'étude a montré que le système TheGreefa, avec son coût actuel, ne peut pas offrir une période de retour sur investissement acceptable. La demande de chaleur dans la serre est trop faible pour générer les économies de coûts qui permettraient de couvrir les coûts de mise en œuvre du nouveau système.

Étant donné que le système TheGreefa n'est pas encore prêt à être commercialisé en tant que produit, il existe toujours une opportunité et des efforts sont faits pour réduire le coût du système. Il convient également d'envisager d'analyser les éventuelles contraintes liées aux exigences des serres dans lesquelles le système pourrait être mis en œuvre. Tout d'abord, les besoins en chaleur de la serre devraient être analysés. L'étude de la serre suisse peut ensuite être utilisée comme base pour classer les options de mise en œuvre possibles.

5. Aspects sociaux et politiques

Compte tenu du champ d'application et des avantages de la technologie proposée dans le projet, les recommandations politiques doivent être basées sur l'examen de cinq domaines fondamentaux : Agriculture, énergie, eau, produits chimiques et sécurité alimentaire. Dans cette présentation, nous verrons les principaux documents stratégiques et réglementaires dans chacun de ces domaines au niveau européen, puis nous identifierons sur cette base certaines recommandations politiques qui, selon nous, pourraient faciliter l'utilisation de la technologie proposée.

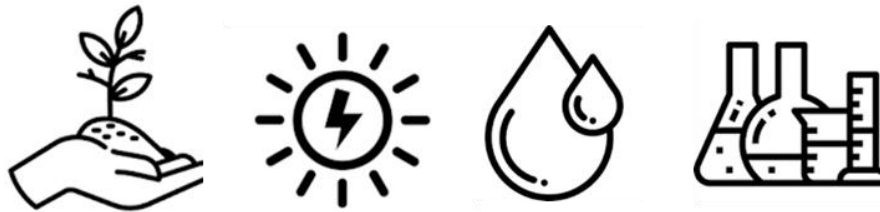


Figure 63. Principaux domaines de révision des politiques - agriculture, énergie, eau et produits chimiques.

5.1. Cadre stratégique européen pour l'agriculture

Le changement climatique et la dégradation de l'environnement constituent une menace existentielle pour l'Europe et le monde. Pour relever ces défis, le Green Deal européen vise à transformer l'UE en une économie moderne, efficace dans l'utilisation des ressources et compétitive, garantissant l'absence d'émissions nettes de gaz à effet de serre d'ici 2050, une croissance économique découplée de l'utilisation des ressources et ne laissant aucune personne ni aucun lieu derrière elle.

La stratégie "de la ferme à la table" est au cœur du Deal vert européen, qui vise à rendre les systèmes alimentaires équitables, sains et respectueux de l'environnement. Elle promeut un système alimentaire plus durable et l'un de ses principaux objectifs est de faire en sorte que suffisamment de nourriture soit abordable et nutritive sans dépasser les limites de la planète.

Une proposition de cadre juridique pour les systèmes alimentaires durables est présentée afin de soutenir la mise en œuvre de la stratégie et le développement d'une politique alimentaire durable.

La PAC 2023-27 est entrée en vigueur le 1er janvier 2023. Les plans approuvés doivent contribuer de manière significative aux objectifs du "Green Deal" européen, de la stratégie "de la ferme à la table" et de la stratégie pour la biodiversité, en permettant la modernisation de l'agriculture par le développement de pratiques agricoles plus durables, tout en protégeant la nature et en luttant contre le changement climatique.

Parmi les instruments qui continueront à promouvoir les pratiques agricoles durables dans l'ensemble de l'UE figure la conditionnalité, qui lie les paiements de la PAC liés à la surface et aux animaux à une série d'engagements. En outre, les nouveaux régimes écologiques seront introduits pour récompenser les agriculteurs qui vont plus loin dans la mise en œuvre de pratiques agricoles durables. Ces pratiques pourraient inclure la mise en œuvre de systèmes de production respectueux de l'environnement, tels que l'agroécologie, l'agroforesterie et l'agriculture biologique. Le cadre de développement rural comprend également des engagements en matière de gestion de l'environnement et du climat visant à dédommager les agriculteurs et autres bénéficiaires qui se sont portés volontaires pour participer à l'initiative en s'engageant à mettre en œuvre des pratiques durables.

5.2. Cadre juridique européen dans le domaine de l'énergie

La directive 2023/1791 relève considérablement les ambitions de l'UE en matière d'efficacité énergétique et oblige les pays de l'UE à garantir collectivement une réduction supplémentaire de 11,7% de la consommation d'énergie d'ici 2030 par rapport aux projections du scénario de référence 2020.

En outre, le principe de "l'efficacité énergétique avant tout" acquiert pour la première fois une valeur juridique, de sorte qu'il doit être pris en compte par les pays de l'UE dans toutes les politiques pertinentes et les décisions d'investissement importantes dans le secteur de l'énergie et des secteurs non énergétiques. Cet objectif plus ambitieux nécessite en effet de promouvoir davantage les mesures d'efficacité énergétique rentables dans tous les domaines du système énergétique et dans tous les secteurs pertinents où l'activité a un impact sur la demande d'énergie, comme l'agriculture par exemple.

En outre, dans le cadre de cette directive révisée, les pays de l'UE doivent garantir un niveau de compétence adéquat pour les professionnels de l'efficacité énergétique, l'adapter aux besoins du marché et imposer des exigences plus claires et plus strictes concernant les compétences requises. Cela inclut les fournisseurs de services énergétiques, les auditeurs énergétiques, les gestionnaires d'énergie et les installateurs.

Le règlement (UE) 2017/1369 établit un cadre pour les produits ou systèmes liés à l'énergie qui sont mis sur le marché ou mis en service. Il prévoit leur étiquetage et la fourniture d'informations standard sur l'efficacité énergétique, la consommation d'énergie et d'autres ressources pendant l'utilisation, ainsi que des informations supplémentaires pour permettre aux clients de choisir des produits plus efficaces afin de réduire leur consommation d'énergie. L'article 7, paragraphe 2, de la loi stipule que lorsque les États membres mettent en place des mesures d'incitation pour un produit, ils doivent viser les classes d'efficacité énergétique les plus élevées.

La nouvelle directive sur les énergies renouvelables portera la part des énergies renouvelables dans la consommation totale d'énergie de l'UE à 42,5 % d'ici 2030, avec une augmentation indicative supplémentaire de 2,5 % pour atteindre l'objectif de 45 %. Chaque État membre contribuera à cet objectif commun.

Enfin, il convient de mentionner la recommandation de la Commission européenne du 14 mars 2023 sur le stockage de l'énergie, fondement d'un système énergétique décarbonisé et sûr dans l'UE (2023/C 103/01), qui contient une liste de recommandations visant à garantir un recours accru au stockage de l'énergie.

5.3. Cadre juridique européen pour l'eau

La directive-cadre sur l'eau reconnaît que les eaux de la Communauté sont soumises à des pressions croissantes du fait de l'augmentation constante de la demande et que la protection et la gestion durable des eaux doivent être davantage intégrées dans les politiques communautaires telles que la l'agriculture doivent être intégrés. En tenant compte de ces facteurs, elle promeut une utilisation durable de l'eau, fondée sur la protection à long terme des ressources en eau disponibles.

Pour atteindre cet objectif, le processus de planification hydrologique, basé sur la planification intégrée de la gestion des ressources en eau par bassin hydrographique ou district hydrographique, est essentiel. Les États membres veillent à ce qu'un plan de gestion de district hydrographique soit élaboré pour chaque district hydrographique entièrement situé sur leur territoire et qu'il concilie la réalisation des objectifs environnementaux pour les masses d'eau et les écosystèmes associés, en tenant compte de la demande des différentes utilisations de l'eau, à la fois en quantité et en qualité suffisantes.

En outre, un programme de mesures doit être établi pour atteindre les objectifs environnementaux et les États membres peuvent y inclure des mesures de gestion de la demande, y compris la promotion d'une production agricole adaptée, comme les cultures à faible consommation d'eau dans les zones touchées par la sécheresse.

D'autre part, nous devons nous référer au régime économique et financier de l'eau, qui repose sur le principe du recouvrement des coûts inscrit dans la DCE (= les coûts des investissements réalisés par les pouvoirs publics pour permettre la fourniture d'eau aux particuliers sont couverts par le paiement de l'utilisation de l'eau par les différents utilisateurs finaux). L'application de ce principe doit se faire d'une manière qui favorise l'utilisation efficace de l'eau et contribue donc aux objectifs environnementaux poursuivis, par une contribution appropriée des différents usages, conformément au principe du pollueur-payeur et en tenant compte au moins des usages d'approvisionnement, agricoles et industriels. En vertu de ce principe, les administrations publiques compétentes doivent mettre en place des mécanismes de transfert des coûts, qui comprennent généralement des primes pour l'utilisation agricole, lorsque l'application de bonnes pratiques agricoles est démontrée.

5.4. Cadre réglementaire européen pour les produits chimiques

Les règlements REACH et CLP concernent toutes les entreprises qui utilisent des produits chimiques dans le cadre de leurs activités industrielles ou professionnelles (utilisateurs en aval), et pas seulement celles qui fabriquent ou importent des produits chimiques.

Selon ces réglementations, le chlorure de magnésium est un mélange qui n'est pas classé comme dangereux, mais nous pouvons identifier les principales obligations suivantes pour l'utilisation du chlorure de magnésium dans la culture professionnelle en serre :

- Utiliser le mélange uniquement en conformité avec les mesures de contrôle des risques qui être fournies avec les informations reçues de la chaîne d'approvisionnement
- Pour s'assurer que les travailleurs reçoivent des informations adéquates sur le mélange reçoivent

5.5. Conclusions

Comme nous avons pu le vérifier grâce à l'analyse que nous avons menée, la technologie proposée est étroitement alignée avec les recommandations stratégiques et les réglementations qui régissent les domaines concernés par le projet.

Néanmoins, nous pouvons identifier les recommandations politiques suivantes afin de faciliter le déploiement de la technologie proposée dans le projet :

1. Pour s'assurer que les professionnels de l'efficacité énergétique connaissent la technologie proposée et comprennent les avantages qu'elle offre en termes d'efficacité énergétique, conformément au nouveau mandat de la directive (UE) 2023/1791 du Parlement européen et du Conseil du 13 septembre 2023 relative à l'efficacité énergétique, afin de garantir un niveau de compétence adéquat pour les professionnels en matière d'efficacité énergétique.
2. L'adoption par la Commission, conformément à l'article 17 du règlement (UE) 2017/1369 du Parlement européen et du Conseil du 4 juillet 2017 établissant un cadre pour l'étiquetage énergétique, d'un acte délégué complétant le présent règlement en fixant des exigences détaillées pour l'étiquetage de la technologie proposée, afin de permettre aux États membres de mettre en place des mesures d'incitation conformément à l'article 7.2.
3. Dans les bassins hydrographiques touchés par la sécheresse, implication des États membres dans le programme de mesures visant à promouvoir les cultures nécessitant peu d'eau.
4. Prise en compte de la technologie proposée par les autorités compétentes en tant que bonne pratique agricole méritant un bonus dans l'équilibre économique et financier de l'eau.
5. Former les travailleurs à l'utilisation sûre du chlorure de magnésium.

Références

Site web et réseaux sociaux



<https://thegreefa.eu>



<https://x.com/TheGreefa>



<https://www.linkedin.com/company/thegreefa/>



<https://www.youtube.com/@thegreefaprojekt>



https://zenodo.org/communities/thegreefa_h2020_project/



https://explore.openaire.eu/search/project?projectId=corda_h2020::0172da9ca5a679fbb4d0a5f045bd5029

Partenaires TheGreefa et autres parties prenantes

Zurich University
of Applied Sciences



School of
Engineering

IEFE Institute of Energy Systems
and Fluid Engineering

ZHAW

**Zurich University of Applied Sciences – Institute for Energy
Systems and Fluid Engineering**

Serena Danesi – Project Coordinator

serena.danesi@zhaw.ch

Raphael Baumann

baap@zhaw.ch



WATERGY

Watergy GMBH

Martin Buchholz

martin.buchholz@watergy.de



TUB

The Technische Universität Berlin

Reiner Buchholz

reiner.buchholz@tu-berlin.de



INRGREF

**National research Institute of rural engineering, Water and
Forests**

Thameur Chaibi

thameurchaibi@gmail.com

Meriem Soussi

soussi.meriem@gmail.com



SFERA

Sfera società agricola srl

Claudio La Carbonara

claudio.lacarbonara@sferaagricola.it



HYPERBOREA

Hyperborea Srl

Norma Zanetti

n.zanetti@hyperborea.com



MEYER

Meyer Orchideen AG

Hanspeter Meyer

hanspeter.meyer@swissorchid.ch

STRANE

STRANE INNOVATION SA

Raphaël Hercelin

raphael.hercelin@strane-innovation.com

Nathalie Vallee

nathalie.vallee@strane-innovation.com

IZNAB

IZNAB SPOLKA Z OGRANICZONA ODPOWIEDZIALNOSCIA

Jakub Pluta

jakub.pluta@iznab.pl

UAL

Universidad de Almería

Francisco Domingo Molina Aiz

fmolina@ual.es

MAS

Moragues and Scade Abogados

Juan Luis Moragues

jlm@mas-abogados.com

Begoña Benito

bbg@grupomas.net

LUH

Leibniz Universität Hannover

Philipp Geyer

philipp.geyer@iek.uni-hannover.de



www.thegreefa.eu



"Ce projet a été financé dans le cadre du programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne, au titre de la convention de subvention n° 101000801."