

Sobre : une formation continue au service des économies d'énergie dans les serres de recherche

Rémi Gardet¹
Laurent Charlon²
Stéphane Bernard³
Étienne Chantoiseau⁴

CORRESPONDANCE

remi.gardet@institut-agro.fr

RÉSUMÉ

Soutenu par la DRSE d'INRAE, le projet « Sobre » a permis de concevoir et d'expérimenter une formation continue destinée à renforcer les compétences des ingénieurs et techniciens responsables des serres et des salles de culture de recherche. Les compétences acquises permettront aux participants de s'appuyer sur des leviers d'optimisation des consignes, afin de réduire les consommations énergétiques, notamment concernant le chauffage et l'éclairage. Cette initiative pilote ayant démontré son efficacité, elle pourrait être déployée à plus grande échelle sous une forme décentralisée et à distance, et bénéficier ainsi à l'ensemble des agents intervenant dans les infrastructures de recherche végétale en conditions contrôlées.

MOTS-CLÉS

Serre ; salle de culture ; énergie ; sobriété ; formation

1 INRAE, Institut Agro Rennes-Angers, Université d'Angers, UMR IRHS, SFR QUASAV, 49071 Beaucouzé, France.

2 INRAE, Institut Agro Rennes-Angers, Université de Rennes, UMR IGEPP, 35653 Le Rheu, France.

3 INRAE, Université Clermont-Auvergne, UMR GDEC, 63000 Clermont-Ferrand, France.

4 Institut Agro Rennes-Angers, UP Ephor, 49045 Angers, France.

Sobre: a continuing education program to support energy savings in research greenhouses

Rémi Gardet¹
Laurent Charlon²
Stéphane Bernard³
Étienne Chantoiseau⁴

CORRESPONDENCE

remi.gardet@institut-agro.fr

ABSTRACT

Supported by INRAE's division for Social and Environmental Responsibility, the "Sobre" project enabled the design and testing of a training program aimed at strengthening the skills of engineers and technicians responsible for managing research greenhouses and growth chambers. By leveraging optimization strategies for setpoint management, the program aims to allow the trainees to reduce energy consumption, particularly for heating and lighting. Having proven its effectiveness, this pilot initiative could be scaled up and delivered in a decentralized, remote format, thereby benefiting all personnel involved in controlled-environment plant research facilities.

KEYWORDS

Greenhouse; grow chamber; energy; sobriety; conserver training

1 INRAE, Institut Agro Rennes-Angers, Université d'Angers, UMR IRHS, SFR 42071 QUASAV 49071 Beaucouzé, France.

2 INRAE, Institut Agro Rennes-Angers, Université de Rennes, UMR IGEPP, 35653 Le Rheu, France.

3 INRAE, Université Clermont-Auvergne, UMR GDEC, 63000 Clermont-Ferrand, France.

4 Institut Agro Rennes-Angers, UP Ephor, 49045 Angers, France.

Introduction

La recherche met chaque jour en lumière les enjeux cruciaux du réchauffement climatique et la nécessité impérieuse de dé-carboner nos sociétés. Dans ce contexte, l'exemplarité est devenue une priorité pour les directions des instituts de recherche. Dans un contexte particulièrement marqué par l'inflation, elles redoublent d'efforts pour mettre en œuvre des plans de sobriété énergétique.

Cependant, au-delà de ces gestes visibles, la recherche s'appuie sur des processus régulés, automatisés et continus, souvent très énergivores. Les serres ou les salles de culture climatisées et éclairées, indispensables aux études en recherche végétale, représentent des points de consommation énergétique majeurs. La transition énergétique dans ce domaine repose sur deux leviers principaux : l'investissement, avec l'adoption de technologies plus économiques telles que l'éclairage LED et la sobriété, en limitant la taille des essais ou en améliorant la régulation de ces processus pour réduire leur consommation.

Le projet « Sobre », retenu par l'appel à projets « pépinière RSE » d'INRAE vise à réduire la consommation énergétique des infrastructures de recherche végétale, telles que les serres et les salles de culture. Il s'agit de renforcer les compétences des ingénieurs et techniciens chargés de leur exploitation, grâce à une formation conçue dans le cadre du projet. Dans cet article, nous expliquons le processus de création de cette formation technique, depuis l'idée initiale jusqu'à sa mise en œuvre. Nous commençons par une analyse des besoins en rappelant le contexte, puis nous expliquons la conception du contenu pédagogique. Nous présentons ensuite un retour sur la mise en œuvre de la formation et terminons avec la proposition d'un déploiement de la formation à l'échelle de l'Institut.

La plateforme Phenotic

Les données présentées dans cet article proviennent de la plateforme angevine Phenotic, ISC (infrastructure scientifique collective) de l'UMR Institut de Recherche en Horticulture et Semence (IRHS), membre de l'Infrastructure de Recherche Phenome-Emphasis. Sur 8 000 m² de serres et salles de culture, Phenotic met en œuvre des équipements de phénotypage haut débit et des surfaces d'expérimentation en conditions contrôlées et confinées. <https://phenotic.hub.inrae.fr>

Intérêt d'une formation approfondie

Une consommation énergétique élevée des serres et des salles de culture inhérente à la recherche sur le végétal

La recherche en biologie végétale requiert souvent des conditions de culture très contrôlées pour analyser les effets des facteurs génétiques sans biais expérimental. Les serres

et les salles de culture offrent un environnement stable et reproductible, essentiel pour comparer différents génotypes dans des conditions identiques ou au contraire pour appliquer des variations environnementales contrôlées à un même ensemble de génotypes. Cependant, ces infrastructures sont extrêmement énergivores, en particulier en raison des besoins en chauffage, refroidissement et éclairage pour maintenir un environnement contrôlé. La consommation énergétique d'une serre peut être jusqu'à 25 fois supérieure à celle d'un bâtiment tertiaire ou d'un logement conforme aux normes actuelles. Ainsi, une serre destinée à la production de tomates peut consommer près de 300 kWh/m²/an (Grisey *et al.*, 2022), contre seulement 12 kWh/m²/an pour le chauffage d'un logement conforme à la réglementation RT2020. Les salles de culture ne font pas exception : pour atteindre un éclairage comparable à celui de la lumière naturelle, il faut installer des équipements très puissants, pouvant atteindre 400 W électrique par m². Combinés aux systèmes de contrôle de la température, qui consomment aussi de l'électricité, ces équipements conduisent à une consommation électrique importante (jusqu'à 3800 kWh/m²/an sur Phenotic à Angers).

L'amélioration de la performance énergétique des serres et salles de culture

L'amélioration de l'enveloppe des bâtiments est une solution déployée au sein d'INRAE sur les nouveaux bâtiments, également valable pour les serres. Les graphiques A et B de la figure 1 montrent que la serre HPE (haute performance environnementale) de Bordeaux a des besoins énergétiques divisés par 1,8 par rapport à la serre témoin. Le graphique C montre qu'en retranchant la production de panneaux photovoltaïques installés sur la toiture de l'annexe, les besoins en chauffage sont totalement compensés.

Toutefois, ces solutions impliquent des investissements conséquents. Comme en témoigne le projet réussi de la serre HPE, la consommation énergétique est 5 fois moins importante qu'une serre témoin (Figure 1), mais pour un coût de construction d'environ 4400 €/m² (double vitrage, verre à faible émissivité), contre 1000 €/m² pour une serre de même niveau de confinement à Angers construite la même année (coûts 2014 non révisés).

L'efficacité énergétique des serres et salles de culture

Pour réduire la consommation énergétique des serres et des salles de culture, plusieurs solutions technologiques existent. Parmi elles, l'éclairage LED se distingue par son efficacité énergétique accrue, ce qui limite la consommation d'électricité tout en produisant moins de chaleur et en réduisant notamment les besoins en refroidissement des salles de culture. Mais l'amélioration de l'enveloppe est aussi un levier important en serre avec, entre autres, la possibilité d'utiliser un double vitrage ou un revêtement à faible émissivité. Cependant, la nécessité de garder une transparence importante limite les gains possibles.

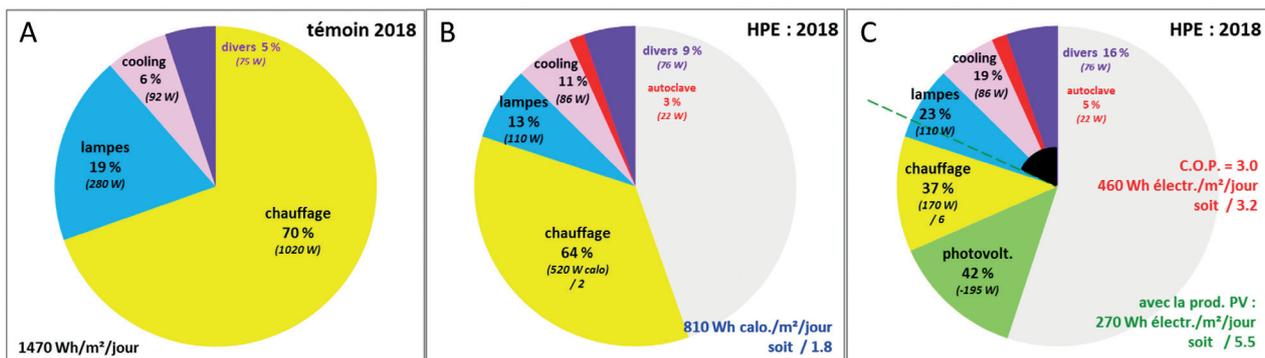


Figure 1. L'exemple réussi d'efficacité de la serre HPE à INRAE Bordeaux (données moyennes de 2014 à 2018, confirmées entre 2019 et 2024) (Just, 2018)

La sobriété possible dans les serres par la maîtrise de leur régulation

Alors que l'efficacité énergétique permet d'utiliser moins d'énergie pour satisfaire un besoin, la sobriété consiste elle à réduire le besoin « à la source » (négaWatt, 2016). L'efficacité correspond plutôt à la performance des équipements alors que la sobriété est liée à nos usages.

Afin de réduire de manière significative la consommation énergétique des serres et des salles de culture, le projet « Sobre » privilégie une approche de sobriété énergétique. En s'appuyant sur des actions simples mais efficaces, il vise à optimiser l'utilisation des ressources énergétiques sans recourir à de lourds investissements. La formation des utilisateurs est ainsi un levier de sobriété.

Par souci de rigueur scientifique et par nécessité de répétabilité d'un essai à l'autre, le chercheur va souvent demander la programmation d'un jeu de consignes simples, avec une alternance de températures jour/nuit complétée par une durée d'éclairage photosynthétique supplémentaire pour assurer le fonctionnement physiologique « normal » de la plante étudiée. Ce paramétrage semble adapté à une salle de culture. En serre, il ne permet pas de prendre en compte les consignes de régulation climatique pour lesquelles un optimum technico-économique est recherché afin de réaliser des économies d'énergie, par exemple en ajustant le chauffage au rayonnement et donc à l'activité photosynthétique potentielle. Ces principes de régulation des serres de production horticole appliqués dans les serres de recherche peuvent être une source de sobriété importante.

La régulation des salles de culture plus simple que celle d'une serre

La régulation climatique d'une salle de culture, par une enveloppe isotherme équipée d'actionneurs nécessaires au contrôle environnemental, ne dépend que très faiblement du climat extérieur. Cette régulation repose sur des boucles de régulation qui agissent directement sur les actionneurs, avec des modulations

assurées par des fonctions PID (proportionnel, intégral, dérivé) préprogrammées. L'opérateur a peu de paramètres à configurer, au-delà des jeux de consignes simples présents dans un protocole standard. Une formation de perfectionnement semble donc moins pertinente que pour la régulation des serres, même si la consommation énergétique d'une salle de culture est nettement supérieure rapportée au m². Pour réduire cette consommation énergétique, la recherche d'efficacité semble le principal levier (éclairage LED), complétée par une gestion optimisée des périodes d'utilisation.

Construction et réalisation d'une formation pilote

Le projet Sobre s'est appuyé dès sa conception sur trois installations expérimentales (Phenotic, VégéPôle¹, IE-IGEP²), avec des programmes de recherche de trois départements (SPE³, BAP⁴, AES⁵), portant sur des espèces différentes (grandes cultures et cultures spécialisées) et dans des contextes climatiques contrastés (océanique et continental) pour construire une formation pilote entre octobre et décembre 2023, pour une durée totale de 2,5 jours.

Une formation pilote : la physique pour comprendre les principes de régulation et atteindre des cibles d'économie d'énergie

L'étude approfondie des principes de thermodynamique appliqués à l'environnement confiné d'une serre (ou d'une salle de culture) permet de mieux comprendre les interactions entre les différents paramètres climatiques et leurs impacts sur la croissance des plantes. Les déperditions énergétiques d'une serre, nettement supérieures à celles d'un bâtiment tertiaire, soulignent la nécessité d'une régulation précise et adaptée. Les facteurs tels que l'ensoleillement, la conductivité des matériaux et la ventilation jouent un rôle primordial dans la dynamique thermique de la serre. Cette compréhension approfondie est indispensable pour optimiser et comprendre les stratégies de régulation.

1. <https://piaf.clermont.hub.inrae.fr/le-piaf/dispositifs-d-experimentation/vegepole>

2. <https://igepp.rennes.hub.inrae.fr/l-igepp/plateformes/serres-et-installations-experimentale>

3. Santé des Plantes et Environnement

4. Biologie et Amélioration des Plantes

5. AgroEcoSystèmes

La compréhension des principes thermodynamiques permet également de différencier les systèmes de culture fermés, tels que les salles de culture, des systèmes ouverts comme les serres. En effet, la serre, soumise aux fluctuations climatiques extérieures, constitue un système thermodynamique bien plus complexe. Les leviers d'optimisation de la régulation sont donc plus nombreux et plus difficiles à maîtriser.

Or, les phénomènes physiques en environnement contrôlé sont en lien direct avec la physiologie végétale. Les processus de photosynthèse et de respiration sont étroitement liés aux conditions environnementales. La transpiration végétale, par exemple, joue un rôle crucial dans la régulation du microclimat de la serre (en refroidissant l'air). Dans les serres de production, une forte densité de plantes peut entraîner une hygrométrie élevée, tandis que dans les serres de recherche, avec des densités de plantes parfois faibles, un climat sec peut induire une fermeture stomatique, limitant ainsi les échanges gazeux et la photosynthèse. Ces interactions soulignent l'importance d'une régulation précise pour garantir des conditions de culture optimales et éviter les biais expérimentaux.

Enfin, ces compétences en physique permettent également d'appréhender la régulation climatique nécessaire, non seulement

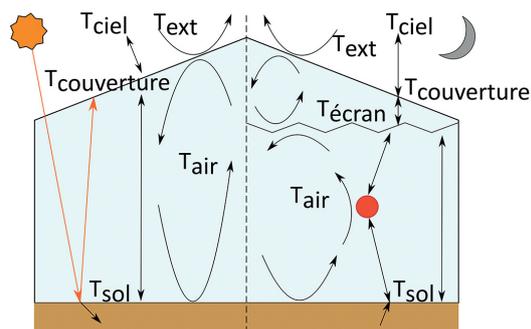
pour optimiser la croissance des plantes en contexte de production de matériel végétal, mais aussi pour étudier les interactions complexes entre les plantes et leurs pathogènes dans le cadre d'activités de recherche. En effet, la régulation précise des conditions environnementales est essentielle pour reproduire des conditions d'infection optimales et ainsi mieux comprendre les mécanismes de développement des maladies. Il en va de même pour l'étude de stress abiotique, par exemple l'application d'un stress hydrique.

Les bilans de ces échanges physiques diurnes et nocturnes (Figure 2) constituent donc la base des principes de régulation mis en œuvre dans la gestion du climat d'un environnement contrôlé d'une serre. La formation balaye l'ensemble de la régulation, en s'attachant à expliquer le lien entre les jeux de consignes, les principes physiques sous-jacents et les besoins des végétaux.

L'écran thermique, un exemple concret de régulation

Le tableau 1 est un exemple de la modulation de la régulation d'un écran thermique. Les écrans thermiques sont dépliés pour permettre de limiter les déperditions liées aux échanges entre

Bilan des échanges dans une enceinte



Bilan des échanges autour d'une plante

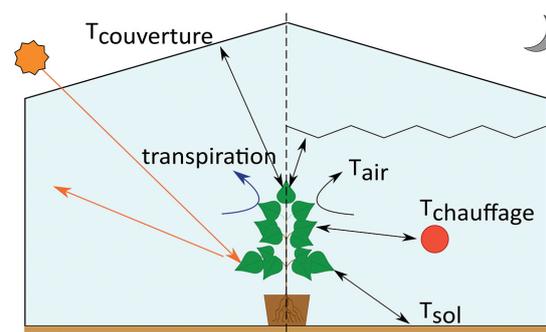


Figure 2. Bilans des échanges sous serre et sous abris (Chantoiseau, 2023)

Tableau 1. Modulation de la régulation (sur rayonnement et température) d'un écran mixte ombrage-thermique (exposé de 3 consignes sur les 23 consignes disponibles)

Consignes dans l'ordre de priorité (de la plus prioritaire à la moins prioritaire)		
Jeux de consignes	Objectifs de la régulation	Fonctionnement
Utilisation des toiles d'écran en thermique (1)	Autorise ou non l'utilisation des écrans en thermique. Si l'autorisation est donnée, les écrans thermiques seront déployés de l'heure du coucher du soleil à l'heure de lever du soleil	Heure du coucher du soleil = déploiement Heure de lever du soleil = repliement
Écart entre la température ambiante et la température extérieure au-dessus duquel on autorise le déploiement en thermique (2)	Automatise le fonctionnement de l'écran thermique en fonction de la différence entre les températures de chauffage ($T^{\circ}\text{chauffage}$) et extérieure ($T^{\circ}\text{ext}$) dès que des déperditions peuvent générer des consommations énergétiques dues au chauffage ($T^{\circ}\text{ext} < T^{\circ}\text{chauffage}$ en hiver), et a contrario n'autorise pas le déploiement de l'écran thermique pour permettre un rafraîchissement nocturne ($T^{\circ}\text{ext} > T^{\circ}\text{chauffage}$ en été)	Par exemple pour une $T^{\circ}\text{chauffage}$ de 18°C et pour une valeur de cette consigne de -1°C Si $T^{\circ}\text{ext} < 19^{\circ}\text{C}$ Respect de la consigne (1) Si $T^{\circ}\text{ext} > 19^{\circ}\text{C}$ L'écran n'est pas déployé en thermique
Écart entre la température ambiante et la température extérieure au-dessus duquel on respecte le seuil d'ensoleillement (3)	Autorise la modulation du déploiement et repliement de l'écran en fonction du seuil d'ensoleillement, en fonction d'un écart de température plus important entre la température de chauffage et la température extérieure	Consigne = $+13^{\circ}\text{C}$ Si $T^{\circ}\text{ext} < 5^{\circ}\text{C}$ Déploiement et repliement en fonction de consignes de rayonnement

l'intérieur et l'extérieur (Figure 2) en créant une couche isolante supplémentaire non permanente. Le gain est estimé entre 10 et 30 % (Grisey *et al.*, 2022).

Les consignes exposées dans le tableau 1 permettent de réaliser des économies d'énergie en adaptant automatiquement le déploiement de l'écran thermique en fonction des conditions météorologiques et des besoins de la plante en termes de photosynthèse. Ainsi, plus le temps devient couvert et froid, plus les déperditions thermiques sont estimées importantes et peuvent être limitées par le déploiement de l'écran thermique. Cependant, ce déploiement anticipé est limité afin de ne pas contrarier la photosynthèse des plantes. Si la serre est équipée d'un éclairage photosynthétique, le paramétrage pourra anticiper davantage les déploiements en considérant que les économies d'énergie sur le chauffage sont plus importantes que la consommation de l'éclairage, qui permet le maintien de la photosynthèse avec des écrans déployés en pleine journée. Ce cas de figure peut paraître paradoxal, mais il peut être source d'économie d'énergie et compatible avec un fonctionnement physiologique normal des plantes.

Toujours en s'appuyant sur cet exemple, l'intérêt de l'automatisation pour les économies d'énergie peut être démontré. Si le déploiement de l'écran thermique n'est pas automatisé au-delà d'une autorisation horaire (consigne 1 du tableau 1), il est logique de désactiver cette fonction en été pour permettre le rafraîchissement thermique nocturne. Mais il existe alors un risque d'oubli de réactivation des écrans thermiques en période de chauffage et donc de consommation énergétique accrue. Par ailleurs, à la mi-saison, l'opérateur peut ne pas faire les bons choix. La modulation du déploiement de l'écran thermique en fonction de l'écart entre la température intérieure et la température extérieure (consignes 2 et 3 du tableau 1) permet d'automatiser complètement cette fonction et de réaliser éventuellement des ajustements des valeurs seuils (températures ou rayonnement) en fonction du développement de la plante et des objectifs d'économie d'énergie.

Cet exemple illustre un jeu de consignes complexes pour réali-

ser des économies d'énergie. Il existe d'autres jeux de consignes ayant le même objectif de sobriété qui permettent de moduler la consigne de chauffage en fonction du rayonnement d'ajuster l'éclairage artificiel ou de foisonner les appels de puissance sur une installation comportant plusieurs modules.

Mise en œuvre des cibles, analyses des résultats et discussion

Premiers résultats issus des compétences acquises lors de la formation pilote

La figure 3 présente la modulation de la consigne de chauffage en fonction du rayonnement extérieur mise en place sur Phenotic, qui a permis de ramener une consigne de chauffage présente sur un protocole expérimental de 22 °C à 20 °C pour éviter des consommations superflues quand la photosynthèse est naturellement limitée et, inversement, utiliser le réchauffement par effet de serre pour favoriser la photosynthèse quand celle-ci est importante.

Les gains énergétiques se visualisent par l'abaissement de la consigne de chauffage de 20 °C au lieu de 22 °C en l'absence de rayonnement et par du chauffage partiellement « gratuit » apporté par le rayonnement, avec une courbe de la température désirée qui suit la courbe du rayonnement. Au coucher du soleil (rayonnement décroissant puis nul), la température désirée est de nouveau à 20 °C, ce qui correspond à un jour étendu avec de l'éclairage photosynthétique, puis une température désirée de nuit de 18 °C. Cette modulation permet donc aussi d'adapter les besoins en chaleur à l'éclairage installé et, ainsi, d'ajuster la température à l'activité photosynthétique supposée plus élevée avec un rayonnement naturel élevé par rapport à un éclairage artificiel. Une fois encore, le paramétrage peut être affiné en faisant varier à la baisse ou à la hausse les températures et le rayonnement seuils pour trouver le meilleur compromis physiologique et énergétique.

En plus de l'exemple précédent, d'autres cibles ont été mises en place dans une partie des serres de la plateforme Phenotic. L'analyse montre une diminution des températures de chauffage



Figure 3. Visualisations de la modulation de la température désirée en fonction du rayonnement

calculées et imposées par la régulation ou des heures de fonctionnement de l'éclairage photosynthétique. Mais les économies d'énergie sont compliquées à calculer car elles dépendent de la météorologie (température extérieure, couverture nuageuse, ...).

Sur la plateforme mutualisée Phenotic, le cumul des efforts d'efficacité et de sobriété a permis de réduire de 33 % les consommations post-Covid de 2021 à 2023, passant de 3,18 MWh à 2,12 MWh (données de la direction du patrimoine et de l'immobilier INRAE) pour une activité croissante (mise en service de robots de phénotypage haut débit en conditions contrôlées).

Pour conclure, les interactions sont nombreuses : le déploiement des écrans thermiques en fonction du rayonnement permet des gains de chauffage, mais peut générer une consommation électrique supplémentaire par l'utilisation accrue de l'éclairage photosynthétique lui-même modulé, et cette cible doit être différenciée d'une serre à l'autre.

De la formation pilote vers un cycle de formation continue pour une sobriété durable

Initialement prévue entièrement en présentiel pour faciliter les échanges, la formation s'est déroulée à la fois en présentiel et en distanciel. Cette dernière modalité, sans contrainte logistique, a été évaluée en adéquation avec le contenu, aussi bien sur les apports théoriques que sur la mise en œuvre pratique et l'analyse des résultats, les participants pouvant partager leurs écrans, voire prendre en main à distance les logiciels pour l'exploitation des données.

En s'appuyant sur l'exemple du groupe témoin de cette première formation, dans le cas de sessions en distanciel sur une durée de deux jours (3000 €) pour les agents chargés de la régulation climatique de trois installations expérimentales (totalisant 400 K€ de dépenses de fluide), une formation annuelle représente moins de 1 % du budget en fluide de ces installations pour des gains supérieurs. Un rythme annuel permettrait un retour sur les cibles, l'analyse des résultats, le reparamétrage si nécessaire et l'exploration de nouvelles pistes d'amélioration.

L'analyse des cibles dans la formation pilote a montré qu'il était difficile de mesurer quantitativement les gains en économie d'énergie. C'est pourquoi il est nécessaire de définir des indicateurs pour suivre « l'efficacité » des mesures de sobriété mises en œuvre. Ces indicateurs peuvent identifier la consommation spécifique d'un équipement, mesurer les changements de pratiques après sensibilisation des utilisateurs ou établir un suivi à une échelle plus globale de l'installation expérimentale pour informer les tutelles, qui apportent des financements pérennes.

Avec les utilisateurs scientifiques, intégrer les nouvelles compétences dans les protocoles et en mesurer les gains

Lors de la formation pilote menée avec Phenotic, les cibles n'ont pas pu être mises en place sur l'ensemble des modules de serres, car l'essentiel des utilisations doit respecter un

protocole dont l'adaptation à un paramétrage plus économe nécessite une phase de discussion avec l'équipe scientifique utilisatrice.

Une formation spécifique à ces jeux de consignes permettant la sobriété est d'autant plus nécessaire qu'ils sont complexes à comprendre, même avec une documentation technique, du fait des interactions entre paramètres et mesures environnementales (Tableau 1).

Ces nouvelles compétences doivent être l'occasion de discuter avec les scientifiques utilisateurs des serres pour revoir les protocoles en intégrant ces jeux de consignes déjà présents dans la plupart des systèmes de régulation, conçus également pour la production. Si ces changements de paramétrage doivent rester compatibles avec les objectifs scientifiques, l'évolution de consignes basiques vers un paramétrage plus économe en énergie peut s'accompagner d'une meilleure prise en compte des besoins physiologiques de la plante, par exemple l'adaptation de la température au rayonnement.

Conclusion et perspectives

Nous terminons par la proposition d'un déploiement de la formation à l'échelle d'INRAE. Une formation fondée sur la définition de cibles et l'analyse de leurs résultats mériterait d'être organisée de manière pluri-annuelle en distanciel auprès de la communauté des serristes par groupes homogènes de deux ou trois unités. L'ancrage des compétences dans les équipes en charge des serres de recherche et une évaluation quantitative des gains énergétiques seraient alors possibles.

Ces formations sur le pilotage de serres et de salles de culture pourraient également répondre, dans la durée, aux besoins d'expertises croissants en matière d'environnement contrôlé. En effet, les questions biologiques soulevées par la transition agroécologique sont complexes, avec la prise en compte d'interactions multiples nécessitant de croiser les données génétiques, d'environnement et de conduite des cultures afin de gérer les risques multiples. L'utilisation d'environnements contrôlés semble une piste d'investigation robuste, notamment du point de vue du traitement statistique des données, mais un contrôle imparfait peut être à l'origine de biais expérimentaux. Pour continuer à être pertinentes, les installations en environnement contrôlé doivent être de mieux en mieux régulées en se rapprochant des besoins de la plante, tout en permettant la différenciation de certains paramètres, en intégrant la régulation climatique, mais aussi d'autres paramètres comme l'irrigation, la fertilisation et l'environnement biologique des cultures, tel que le microbiote. Cette perspective incite, dans la continuité de la formation proposée pour la sobriété, à intégrer l'acquisition de ces compétences supplémentaires pour les agents d'INRAE chargés du fonctionnement des serres et des salles de culture, aux régulations et automatismes complexes. ■

Références

- Grisey, A., Brajeul, E., & Oudin, T. (2022). *Évolution du parc de serres et des équipements de chauffage en France depuis 2016*. CTIFL, 385.
- Association négaWatt (2016). Sobriété et efficacité énergétique. Consulté le 22 avril 2025 sur <https://negawatt.org/sobriete-efficacite>.
- Just, D. (2018). La Serre pilote HPE de Bordeaux. [École technique]. Intégration de la démarche écoresponsable dans les pratiques expérimentales.
- Chantoiseau, É. (2023). Culture sous serres et sous abris. [Cours magistral en master, Institut Agro Rennes-Angers].



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-SA). <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « NOV'AE », la date de sa publication et son URL.