

## Saisine du Comité Scientifique CTPS

Prise en compte de l'adaptation au changement climatique  
lors de l'inscription des variétés au Catalogue National



Sarah Tozzo, Bénédicte Bakan, Virginie Bertoux, Stéphane Cordeau, Jérôme Enjalbert, Arnaud Gauffreteau, Julie Gombert, David Gouache, Aurélia Gouleau, Nicolas Henry, Anne Laperche, Valérie Leclere, Fabrice Lheureux, Frédéric Moquet, Delphine Tailliez, Patrice This, Christian Huyghe

Novembre 2024

## Plan du rapport de saisine

<b>RESUME EXECUTIF</b> .....	<b>4</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>7</b>
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>10</b>
<b>METHODOLOGIE – QUESTIONNAIRE A L’ATTENTION DES SECTIONS ET COMMISSIONS DES INTER-SECTIONS DU CTPS</b> .....	<b>14</b>
<b>WP1 : ÉTAT DES LIEUX, PROJECTIONS CLIMATIQUES ET ENJEUX</b> .....	<b>15</b>
A.    ORIGINES ET CAUSES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE .....	15
1. <i>Implication du secteur agricole dans les émissions de GES</i> .....	15
2. <i>Implication du système alimentaire dans les émissions de GES</i> .....	17
B.    SITUATION ACTUELLE ET PERSPECTIVES .....	18
1. <i>Scénarios climatiques, mode d’emploi</i> .....	18
2. <i>Projections : quels climats en 2050 ?</i> .....	19
3. <i>Années 2022 et 2024 : projections d’un futur plus que probable ?</i> .....	28
a.    Description du climat de l’année 2022.....	28
b.    Impacts sur les filières agricoles en 2022.....	29
c.    Situation de la saison 2023 – 2024.....	30
4. <i>Focus sur les territoires ultramarins</i> .....	31
C.    LES EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA REPONSE PHYSIOLOGIQUE DES PLANTES CULTIVEES .....	34
1. <i>Les effets de l’augmentation de la concentration en CO<sub>2</sub></i> .....	34
2. <i>Les effets du changement des températures moyennes</i> .....	34
3. <i>Evolutions tendancielle et variabilité climatique</i> .....	35
4. <i>Combinaisons de stress abiotiques et biotiques</i> .....	36
a.    Combinaison du stress hydrique et des stress biotiques .....	37
b.    Combinaison du stress « thermique » et des stress biotiques.....	38
c.    Combinaison d’une augmentation de la concentration en CO <sub>2</sub> et des stress biotiques .....	39
5. <i>Impact sur la filière production de semences</i> .....	39
D.    LES ATTENTES ET DEFIS SOCIETAUX QUI ACCOMPAGNENT LE CHANGEMENT CLIMATIQUE .....	39
1. <i>Utilisation de l’énergie</i> .....	40
2. <i>Usage de l’eau</i> .....	41
3. <i>Alimentation</i> .....	42
E.    SYNTHESE DU WP1.....	44
<b>WP2 : QUELS APPORTS ATTENDRE DE LA SELECTION ET DE L’ORGANISATION DE LA FILIERE SEMENCES ET PLANTS ?</b> .....	<b>45</b>
A.    PRECISER LA CIBLE POUR L’INNOVATION ET LA SELECTION VARIETALE POUR FAIRE FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE .....	45
B.    PLASTICITE PHENOTYPIQUE .....	47
C.    ESPACE PHENOTYPIQUE : RESULTANTE DE LA PLASTICITE ET DE LA VARIABILITE GENETIQUE .....	47
D.    RETOUR SUR LE PROGRES GENETIQUE.....	50
1. <i>Evolution des rendements</i> .....	50
2. <i>Évaluation du progrès génétique et des traits variétaux impliqués</i> .....	51
E.    BESOINS DE LA SELECTION POUR FAIRE FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE .....	54
1. <i>Retour des sections sur les besoins de la sélection</i> .....	54
2. <i>Besoins identifiés dans la littérature</i> .....	56
a.    Les défis de la sélection pour faire face au changement climatique.....	56
b.    Stratégies d’adaptations .....	57
c.    S’adapter à la sécheresse et aux fortes températures.....	58
d.    Modification de la phénologie .....	60
e.    Un caractère sous-estimé : l’excès d’eau et sa stagnation.....	61
3. <i>Éléments génériques à extraire pour préciser les cibles de sélection</i> .....	61
F.    LA PLACE DES RESSOURCES PHYTOGENETIQUES DANS L’ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE.....	64
G.    DIVERSIFICATION DES ESPECES ET DES VARIETES.....	67
H.    LES DEFIS POUR LA FILIERE SEMENCES ET PLANTS.....	70
I.    SYNTHESE DU WP2.....	74

<b>WP3 : ETAT DES LIEUX DES AVANCEES DES SECTIONS SUR LA PRISE EN COMPTE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LEURS TRAVAUX .....</b>	<b>75</b>
A.    EXPOSITION AUX STRESS BIOTIQUES ET ABIOTIQUES.....	75
1. <i>Quels sont les principaux stress auxquels sont confrontées les cultures végétales travaillées par les Sections du CTPS ?</i> .....	75
2. <i>Quelles sont les mesures de sécurisation des essais qui ont été mises en place en réponse à ces stress abiotiques ?</i> .....	79
3. <i>Un pilotage actif a-t-il été mis en place dans les réseaux d'essais ou dispositifs d'évaluation pour se confronter volontairement aux stress abiotiques ?</i> .....	79
4. <i>Comment ces stress abiotiques sont-ils pris en compte dans les analyses DHS et/ou VATE ?</i> .....	80
a.    Valorisation des stress rencontrés dans les essais .....	80
b.    Evitement des stress rencontrés dans les essais.....	81
B.    DIFFICULTES RENCONTREES AU COURS DES CYCLES DHS / VATE .....	81
1. <i>Difficultés techniques</i> .....	81
2. <i>Difficultés méthodologiques</i> .....	82
C.    CRAINTES, VEROUS, FREINS ET DIFFICULTES DANS LA PRISE EN COMPTE DE L'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LES TRAVAUX D'EVALUATIONS VARIETALE POUR L'INSCRIPTION AU CATALOGUE.....	83
D.    PRISE EN COMPTE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LES AUTRES OFFICES D'EXAMEN A L'INTERNATIONAL.....	87
1. <i>Prise en compte dans les autres offices d'inscription / post-inscription</i> .....	87
a.    Conduite des essais en période de sécheresse .....	87
b.    Tests spécifiques aux conditions abiotiques .....	88
c.    Valorisation des données climatiques.....	88
2. <i>Réflexions en cours au sein des offices européens</i> .....	90
E.    SYNTHESE DU WP3.....	91
<b>WP4 : COMMENT QUALIFIER LE POTENTIEL D'ADAPTATION DES VARIETES AU CHANGEMENT CLIMATIQUE ?.....</b>	<b>92</b>
A.    UNE EVALUATION A ADAPTER SELON LA DUREE DE VIE DES VARIETES.....	92
B.    EVALUER DANS UN ENVIRONNEMENT INCERTAIN : IMPORTANCE DE DECRIRE ET CARACTERISER LES ESSAIS .....	93
1. <i>Définitions et cadre de l'envirotypage</i> .....	93
2. <i>Mieux caractériser l'environnement pour mieux interpréter les essais variétaux soumis à des aléas</i> .....	94
3. <i>L'apport des outils de modélisation pour caractériser les environnements d'essai</i> .....	96
4. <i>Comment gérer les données manquantes et les plans incomplets ?</i> .....	97
C.    PLACE DU CONTINUUM PRE-INSCRIPTION / INSCRIPTION / POST-INSCRIPTION.....	98
1. <i>Utilisation de données pré-inscription par le déposant</i> .....	98
2. <i>Standardiser le recueil de données</i> .....	98
3. <i>Exploitation des données du déposant</i> .....	99
D.    ADAPTATION DES REGLES D'INSCRIPTION DES VARIETES DANS LE CONTEXTE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE .....	99
1. <i>Rappel sur l'inscription des variétés</i> .....	99
2. <i>Posture du CTPS : informer ou orienter ?</i> .....	100
3. <i>La confrontation volontaire à certains stress : possibilité de mise en œuvre dans le réseau CTPS</i> ....	101
4. <i>Sécuriser ou décrire les environnements stressés ?</i> .....	102
5. <i>De la performance moyenne à la stabilité des variétés</i> .....	102
6. <i>Intégrer l'évaluation de nouveaux critères pour mieux caractériser l'adaptation au changement climatique</i> .....	103
a.    Besoins exprimés par les sections.....	103
b.    Place de la modélisation dans l'évaluation des variétés face au changement climatique et possibilité de mener des expériences virtuelles ou d'ajuster des résultats expérimentaux.....	104
7. <i>Une autre temporalité ?</i> .....	105
8. <i>Faire évoluer le réseau d'essai ?</i> .....	107
E.    SYNTHESE DU WP4.....	108
<b>WP5 : LES RECOMMANDATIONS DU CS.....</b>	<b>109</b>
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>112</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>114</b>
<b>SITOGRAPHIE .....</b>	<b>121</b>
<b>CONFERENCES .....</b>	<b>123</b>
<b>REVUES TECHNIQUES .....</b>	<b>123</b>

## Résumé exécutif

Le changement climatique est une réalité qui affecte la société tout entière, et l'agriculture en particulier. Hausse globale des températures, bouleversement des régimes hydriques, augmentation de la fréquence des événements erratiques, ou encore augmentation des variations interannuelles mettent à l'épreuve la production agricole.

Le Comité Plénier du CTPS (Comité Technique Permanent de la Sélection des plantes cultivées) a sollicité l'éclairage du Comité Scientifique du CTPS, sur la base de la littérature scientifique et technique, sur la manière dont les Sections du CTPS pourraient être plus pro-actives dans la prise en compte de l'adaptation au changement climatique dans leurs travaux d'évaluation variétale en vue de l'inscription au catalogue officiel des espèces et variétés de plantes cultivées, dit Catalogue National.

### **État des lieux, projections climatiques et enjeux**

Le changement climatique est à l'œuvre depuis l'ère industrielle, avec une forte accélération depuis la fin de la seconde guerre mondiale, et ses effets ne sont plus à démontrer. L'augmentation moyenne des températures à l'horizon 2050 sera de l'ordre de +2 à +3°C en France par rapport à l'ère préindustrielle, et les aléas climatiques vont être de plus en plus marqués, fréquents et variés (sécheresse, vagues de chaleur, gel tardif, orages et grêles ...), augmentant encore l'imprédictibilité climatique. L'agriculture, secteur d'activité émetteur de gaz à effet de serre, est sensible au changement climatique : l'augmentation des températures va entraîner des changements phénologiques, un raccourcissement des cycles de culture ou encore une moindre efficacité de la photosynthèse ; l'augmentation de la concentration en CO<sub>2</sub> présente un risque de diminution du contenu protéique des grains des plantes céréalières en C3 ; les vagues de chaleur et la sécheresse vont inciter à un recours plus important à l'irrigation pour ne pas perdre les cultures et pour atténuer l'effet des variations interannuelles ; les ravageurs des cultures vont migrer, avec de nouveaux bioagresseurs pour les agricultures françaises, et les bioagresseurs déjà présents vont subir des évolutions de leurs cycles biologiques. Les combinaisons de ces stress sont difficiles à anticiper, et la réaction des cultures à ces combinaisons de stress reste encore mal connue, mais certaines cultures sont déjà impactées. Des évolutions des zones de culture et adaptations nécessaires des systèmes de culture doivent être réfléchies. Par ailleurs, le changement climatique n'est pas le seul facteur qui va influencer l'agriculture de demain ; il s'accompagne de nombreux défis et attentes sociétaux, tels qu'une diminution du recours aux énergies fossiles, une évolution des modes de protection des cultures avec moins de pesticides de synthèse, des choix relatifs aux usages de l'eau et de son utilisation à des fins d'irrigation, un changement dans l'alimentation vers plus de végétalisation ....

Le futur de l'agriculture apparaît donc relativement incertain, mais il est très vraisemblable qu'il ne ressemblera pas au système actuel.

La réponse à ces changements ne peut se résumer au changement d'une seule pratique ; les leviers d'action sont nombreux, et le matériel végétal est l'un d'entre eux : il s'intègre dans des stratégies d'adaptation globales.

### **Apports attendus de la sélection et organisation de la filière Semences et Plants**

Face aux enjeux imposés par le changement climatique, il est nécessaire de préciser la cible pour l'innovation et la sélection variétale afin d'atténuer ses effets et/ou de s'adapter au mieux, et œuvrer à favoriser la résilience des cultures face au climat.

Pour cela, le travail de sélection variétale dans les espèces cultivées, mais aussi le choix de nouvelles espèces à développer, peut notamment s'appuyer sur l'exploration de l'espace phénotypique des différentes espèces cultivées, résultante de la plasticité phénotypique et de la variabilité génétique, et responsable de leurs adaptations. Un certain nombre de traits d'intérêt ont été identifiés via les questionnaires adressés aux sections et inter-sections du CTPS, ainsi que dans la littérature : on citera par exemple les traits en lien avec l'utilisation de l'eau, la tolérance à la chaleur ou à la sécheresse, la modification de la phénologie pour échapper aux stress ou encore la tolérance à l'excès d'eau.

Les interactions Géotypes – Environnement complexifient le travail de sélection, et ce d'autant plus dans le contexte du changement climatique. Le CS du CTPS propose d'extraire des éléments génériques (qui recouvrent un ensemble de traits) afin de préciser les cibles de sélection qui lui semblent prioritaires pour chacune des espèces cultivées. Pour répondre aux enjeux du changement climatique, il faudra opérer un basculement des priorités pour un grand nombre d'espèces, passant de l'amélioration du potentiel de rendement à une stabilisation du rendement par l'amélioration de la résistance aux stress abiotiques et à une meilleure utilisation des nutriments. L'enjeu de la résistance aux stress biotiques est également renforcé pour de nombreuses espèces.

Il apparaît par ailleurs essentiel de considérer l'apport des ressources phytogénétiques dans l'adaptation au changement climatique, car elles composent un véritable réservoir d'allèles d'intérêt. Ces ressources phytogénétiques sont elles-mêmes menacées par le changement climatique, et leur conservation revêt une importance cruciale afin de maintenir la diversité accessible.

Le changement climatique va probablement contraindre le système agricole à la diversification, que ce soit à travers l'introduction de nouvelles espèces adaptées aux conditions climatiques rencontrées dans les différents territoires, ou par la diversification à l'échelle de la parcelle agricole.

La filière française Semences et Plants va également devoir s'adapter afin de maintenir sa compétitivité : la production de semences et plants de certaines espèces pourra se révéler plus complexe qu'à l'heure actuelle, et des problèmes de quantité et de qualité (germinative et sanitaire) pourront advenir plus fréquemment.

### **Etat des lieux des avancées des sections sur la prise en compte du changement climatique dans leurs travaux**

Le CS du CTPS a réalisé un état des lieux des avancées des sections sur la prise en compte du changement climatique dans leurs travaux, permettant de souligner les avancées, mais également les difficultés déjà rencontrées dans ce contexte et d'avoir connaissance des craintes, verrous et freins relatifs au changement climatique dans les travaux d'évaluation variétale pour l'inscription au catalogue.

Jusqu'à présent, le changement climatique et les aléas qu'il génère pendant les cycles d'évaluation sont un phénomène que la majorité des sections tentent d'éviter ; peu de sections ont mis en place un pilotage actif afin de se confronter volontairement aux stress abiotiques, et la survenue de ces stress reste peu exploitée et prise en compte dans les analyses DHS ou VATE.

Les difficultés remontées par les sections et commissions inter-sections du CTPS sont de deux natures : les difficultés d'ordre technique (conduite des essais, incidence de la modification de la phénologie, présence de valeurs hors-norme, pression accrue des ravageurs...) et les difficultés méthodologiques (données hétérogènes, données manquantes, analyse statistique pertinente...).

Plusieurs craintes, verrous ou freins ont également été signalés : il peut s'agir de problématiques autour de la durée de l'évaluation, des dispositifs expérimentaux, des exigences statistiques ou encore de la complexité à caractériser ce qui est subi en cours d'essai et à évaluer le comportement des variétés faces aux stress abiotiques ...

Une analyse de la gestion des problématiques relatives au changement climatique par les autres offices d'examen à l'international a permis de mettre en évidence des situations similaires à celle de la France : l'évaluation de la résilience des variétés face à la chaleur ou à la sécheresse fait notamment l'objet de réflexions entre les différents offices européens, tout comme la manière de valoriser les informations relatives aux stress abiotiques.

### **Qualifier le potentiel d'adaptation des variétés**

Dans le contexte du changement climatique, il apparaît essentiel de réfléchir l'évaluation des variétés en vue de leur inscription au catalogue officiel des espèces et variétés de plantes cultivées, dit Catalogue national par rapport à la vitesse du renouvellement variétal, car les enjeux et les actions à mettre en place seront alors sensiblement différents. Plus le renouvellement variétal sera lent, moins les investissements en sélection seront forts, plus l'espèce sera menacée.

L'évaluation de l'aptitude d'adaptation des variétés au changement climatique nécessite une caractérisation des environnements d'essai, à travers l'envirotypage. En effet, le CS du CTPS propose de considérer la survenue d'un aléa comme un événement d'intérêt, informatif, qu'il faut être en mesure d'exploiter, et cela passe par une description fine des environnements rencontrés pour les différents essais.

De plus, la variabilité climatique interannuelle et l'impact des conditions annuelles sur les résultats des essais d'inscription soulèvent l'intérêt de réfléchir en termes de séries temporelles, en utilisant le maximum de données disponibles sur le plus long pas de temps possible : l'accent doit ainsi être mis sur le continuum pré-inscription / inscription / post-inscription pour augmenter la probabilité d'incidence de conditions climatiques concordantes avec les scénarios climatiques. A ce titre, la prise en compte des données obtenteurs est proposée, sous certaines conditions, pour offrir la possibilité de valoriser des adaptations intéressantes dans le cadre du changement climatique.

Plusieurs propositions d'adaptation des règles d'inscription sont par ailleurs formulées, pour prendre en compte les problématiques autour du changement climatique, parmi lesquelles : adopter une posture volontariste pour se placer dans des conditions qui vont être représentatives du futur climat que pourrait connaître la variété candidate en incluant un (ou plusieurs) site déporté qui soit représentatif du climat futur projeté, prendre en compte la stabilité des variétés dans un ensemble d'environnements, intégrer de nouveaux critères spécifiques à l'adaptation au changement climatique...

### **Recommandations**

Chaque section du CTPS doit s'approprier les spécificités des espèces dont elle a la charge pour adapter ses règles d'inscriptions et faire évoluer son dispositif expérimental afin de proposer une évaluation pertinente des variétés vis-à-vis des enjeux induits par le changement climatique.

A cette fin, le CS du CTPS émet un certain nombre de recommandations afin d'accompagner les sections du CTPS dans la mise en œuvre de ces évolutions relatives à l'inscription des variétés au catalogue national. Ces recommandations s'adressent plus largement à l'ensemble des acteurs de la filière Semences et Plants, car les problématiques majeures induites par le changement climatique doivent être considérées dans une vision d'ensemble.

Le CS du CTPS recommande de renforcer la capacité d'anticipation et d'orientation du CTPS vis-à-vis du changement climatique, en mettant en place des orientations structurantes (nouveaux bonus, choix des lieux et des conditions d'essais, évolution des types variétaux). Dans chaque section, il convient d'explicitier les effets attendus du changement climatique sur chaque espèce, de définir les traits affectés et les traits d'intérêt, de renforcer la réflexion sur les performances variétales en valeur moyenne et en variance et d'introduire la notion de risque liée à la stabilité des performances variétales. Les essais doivent être mieux caractérisés via l'envirotypage, et les données obtenues dans les évaluations mieux valorisées. Il est recommandé de mobiliser autant que de possible les essais mis en œuvre par les sélectionneurs au cours du processus de sélection pour identifier des comportements variétaux intéressants face aux effets attendus du changement climatique. Au regard des effets induits par les changements climatiques et notamment les variations interannuelles, il est important de sécuriser les lieux où les essais DHS sont conduits pour produire des données de qualité. Pour les espèces et groupes d'espèces sans VATE obligatoire, les sections du CTPS doivent s'interroger sur l'organisation du continuum et sur les corpus de résultats qu'il convient de fournir et de rendre disponibles pour permettre aux acteurs des filières et in fine aux agriculteurs d'anticiper et de s'adapter aux effets du changement climatique.

L'effort de recherche sur l'adaptation génétique des espèces et des variétés aux effets du changement climatique doit également être renforcé.

L'adaptation au changement climatique va demander des ruptures dans nos modes de fonctionnement et dans nos modes de conception. Ce peut être l'occasion d'une mobilisation nouvelle des relations au niveau européen, entre les différents dispositifs nationaux d'inscription des variétés et entre les différents offices d'examen.

## Abstract

Climate change is a reality that affects society as a whole, and agriculture in particular. Rising global temperatures, disrupted water regimes, more frequent erratic events and increased inter-annual variations are challenging agricultural production.

CTPS's Plenary Committee (Comité Technique Permanent de la Sélection des plantes cultivées) asked CTPS's Scientific Committee, on the basis of scientific and technical literature, to advise on how CTPS Sections could be more pro-active in taking climate change adaptation into account in their varietal evaluation work for registration in the National Catalogue.

### **Current situation, climate projections and challenges**

Climate change has been occurring since the industrial era, accelerating dramatically since the end of the Second World War, and its effects are no longer in need of proof. By 2050, average temperatures in France will have risen by between +2 and +3°C compared with the pre-industrial era, and climatic hazards will become more severe, more frequent and more diverse (drought, heat waves, late frosts, thunderstorms and hailstorms, etc.), making the climate even more unpredictable. Agriculture, a greenhouse gas-emitting sector, is sensitive to climate change: rising temperatures will lead to phenological changes, shorter crop cycles and less efficient photosynthesis; rising CO<sub>2</sub> concentrations may reduce the protein content of C3 cereal grains; heat waves and drought will call for greater use of irrigation to avoid crop losses and mitigate the effect of inter-annual variations; crop pests will be migrating, bringing new pests to French agriculture, and existing pests will be subjected to changes in their biological cycles. The combinations of these stresses are difficult to anticipate, and the response of crops to these combinations of stresses is still not well understood, but some crops are already being impacted, and changes in cropping areas and adaptations of growing systems need to be considered. Moreover, climate change is not the only factor that will influence tomorrow's agriculture; it is associated with numerous societal challenges and expectations, such as a reduction in the use of fossil energies, changes in crop protection methods with less use of chemical pesticides, decisions relating to water use and its use for irrigation purposes, and a trend towards more vegetarian food.

The future of agriculture thus appears relatively uncertain, but it is highly likely that it will not look like the current system.

The response to these changes cannot be limited to changing a single practice; there are many levers for action, and plant varieties are one of them: they are part of global adaptation strategies.

### **Expected contributions from breeding and organization of the Seeds and Seedlings sector**

To meet the challenges raised by climate change, we need to define the target for innovation and breeding in order to mitigate its effects and/or adapt to it as much as possible, and promote crop resilience to climate change.

To this end, breeding in cultivated species, as well as choice of new species to be developed, can be based in particular on exploration of the phenotypic space of different cultivated species, resulting from phenotypic plasticity and genetic variability, and driving their adaptations. A number of traits of interest have been identified via surveys sent out to CTPS sections and inter-sections, as well as in the literature: for example, traits linked to water use, heat or drought tolerance, modification of phenology to avoid stress, or tolerance to water excess.

Genotype-environment interactions make breeding more complex, especially in the context of climate change. The CS of CTPS recommends identifying generic elements (covering a range of traits) in order to specify the breeding targets that it considers to be priorities for each crop species. Addressing the challenges of climate change will require a shift in priorities for a large number of species, from improving yield potential to stabilizing yield by improving resistance to abiotic stresses and better nutrient use. The importance of resistance to biotic stress is also increasing for many species.

It is also crucial to consider the contribution of phylogenetic resources in adapting to climate change, as they represent a veritable reservoir of valuable alleles. These phylogenetic resources are

themselves threatened by climate change, and their conservation is of crucial importance in maintaining accessible diversity.

Climate change is likely to lead to diversification of the agricultural system, whether through the introduction of new species adapted to the climatic conditions encountered in different regions, or through diversification at farm plot level.

The French seed and seedling sector will also have to evolve to maintain its competitiveness: seed and plant production for certain species may become more complex than it is now, and problems of availability and quality (germination and health) may arise more frequently.

### **Progress made by sections in taking climate change into account**

The CTPS Scientific Committee carried out an overview of the progress made by sections in taking climate change into account in their work, which allowed to highlight the progress made and to better understand the difficulties encountered in this context, and to know the concerns, constraints and obstacles relating to climate change in varietal evaluation work for registration to the Catalogue.

So far, climate change and the uncertainties it generates during evaluation campaigns are a situation that most sections are trying to avoid. Few sections have set up active piloting to deliberately deal with abiotic stresses, and the occurrence of these stresses is still little exploited and taken into account in DUS or VCU trials.

The issues raised by CTPS sections and inter-section commissions are of two types: technical difficulties (trial management, impact of phenological changes, presence of non-standard values, increased pest levels) and methodological difficulties (heterogeneous data, missing data, relevant statistical analysis). A number of concerns, bottlenecks and obstacles have also been raised: these include experimental set-ups, statistical requirements, and problems relating to the duration of the evaluation, the complexity of characterizing the conditions encountered during the trial and assessing the performance of varieties under abiotic stresses, etc.

An analysis of the handling of climate change issues by other international examination offices revealed situations similar to the French situation: in particular, the assessment of variety resilience to heat or drought is a subject of discussion between the different European offices, as is the way in which data relating to abiotic stresses is processed and exploited.

### **Assessing the varietal adaptation potential**

In the context of climate change, it is essential to consider the evaluation of varieties for registration on the national catalogue in relation to the varietal turnover rate, since the challenges and actions to be taken will then be significantly different. The slower the varietal turnover, and the lower the investment in breeding, the greater the threats for the species.

Assessing the adaptability of varieties to climate change requires the characterization of trial environments, through envirotyping. Indeed, the CS of the CTPS proposes to consider the occurrence of a hazard as an event of interest, informative, that should be able to be exploited, and this requires a detailed description of the environment encountered in the different trials.

In addition, inter-annual climate variability and the impact of annual conditions on registration trial results highlight the need to think in terms of temporal series, using the maximum amount of data available over the longest possible period: emphasis should be given to the pre-registration/registration/post-registration continuum to increase the probability of occurrence of climatic conditions corresponding to climate scenarios. To this end, it is proposed that, under certain conditions, breeders' data be taken into account, so as to offer the possibility of exploiting interesting adaptations in the context of climate change.

A number of proposals for adapting registration rules to take account of climate change issues have also been put forward, including: adopting a proactive approach to ensure that conditions are representative of the future climate that the candidate variety could experience, by including one distant site (or more) that is representative of the projected future climate; taking into account the stability of varieties in a range of environments; integrating new criteria specific to adaptation to climate change, etc.

## **Recommendations**

Each CTPS section must take into account the specific aspects of the species it deals with, in order to adapt its registration rules and evolve its experimental set-up, so as to ensure a relevant evaluation of varieties with respect to the challenges raised by climate change.

To this end, CS CTPS is proposing a number of recommendations to support CTPS sections in implementing these changes to the registration of varieties on the national catalogue. These recommendations are addressed more broadly to all stakeholders of the Seed and Seedling sector, as the major issues brought about by climate change need to be considered from a global perspective.

CTPS's Scientific Committee recommends enhancing CTPS's capacity to anticipate and orientate with regard to climate change, by setting up guidelines (new bonus, choice of trial locations and conditions, evolution of variety types). In each section, the expected effects of climate change on each species need to be specified, traits affected and traits of interest defined, reflection on varietal performance in terms of mean value and variance needs to be strengthened, and the notion of risk linked to the stability of varietal performance needs to be introduced. Trials need to be better characterized through envirotyping, and the data obtained in evaluations better exploited. As far as possible, we recommend taking into account the trials carried out by breeders during the breeding process, in order to identify interesting varietal performance in relation to the effects expected from climate change. With regard to the effects induced by climate change, and in particular inter-annual variations, it is important to secure the sites where DUS trials are carried out in order to provide high-quality data.

For species and groups of species without compulsory VCU exam, the CTPS sections need to reflect on the organization of the continuum and on the results that need to be provided and made available to enable stakeholders and ultimately farmers to anticipate and adapt to the effects of climate change. Research on genetic adaptation of species and varieties to the effects of climate change must also be intensified.

Adapting to climate change will require radical changes in the way we work and in the way we think. This could be an opportunity to renew the relationships at European level, between the different national variety registration systems and between the different examination offices.

## Introduction

### Le Comité Technique Permanent de la Sélection des plantes cultivées

Le CTPS, Comité Technique Permanent de la Sélection des plantes cultivées, est une commission administrative à caractère consultatif assurant une mission de conseil et d'appui technique auprès du ministère chargé de l'agriculture concernant les variétés, semences et plants. Le CTPS est également chargé de l'établissement du catalogue officiel des espèces et variétés de plantes cultivées, et de l'instruction et du suivi de l'application des règlements techniques concernant la production, le contrôle et la certification variétale et sanitaire des semences et plants (Code rural et de la pêche maritime). Le CTPS mobilise plus de 800 personnes, représentants de l'administration, experts scientifiques, et professionnels de l'obtention de nouvelles variétés, de la multiplication des semences et plants, de la production ou de l'utilisation des produits de récolte, sur une large gamme d'espèces (espèces forestières, vigne, légumières, ornementales, fourragères et agricoles). Cette participation large aux réflexions du CTPS permet aux pouvoirs publics français de mettre en œuvre une réglementation en matière de variétés, semences et plants co-construite, à la croisée entre les ambitions des pouvoirs publics en matière de politiques publiques, la réalité des professionnels et l'éclairage scientifique. L'élaboration par le CTPS d'un projet de plan ministériel « Semences et Plants pour une Agriculture Durable », homologué dans sa première version en 2016, et ayant fait l'objet d'une révision en 2021, illustre l'action d'appui et de conseil technique exercée par le CTPS pour le compte du Ministère chargé de l'agriculture. Organisé en 14 sections constituées par groupe(s) d'espèces, une section dédiée à la conservation des ressources phytogénétiques, deux commissions inter-sections dédiées aux plantes de services et à l'Agriculture Biologique, et un Comité Plénier, le CTPS peut s'appuyer sur un Comité Scientifique, mobilisé pour apporter un éclairage scientifique utile aux travaux du CTPS ou aux autorités françaises en amont de l'élaboration de la réglementation.

### Contexte

Le Comité Plénier du CTPS a adressé une demande de saisine ([Annexe 1](#)) au Comité Scientifique du CTPS sur la thématique du changement climatique, avec pour objectif de définir **comment mieux prendre en compte l'adaptation au changement climatique lors de l'inscription des variétés au Catalogue**.

En effet, si la société dans son ensemble est concernée par le changement climatique, le secteur agricole l'est encore davantage et il est urgent de le prendre en compte pour se préparer à y faire face. Le changement climatique est une réalité qui affecte la société tout entière, et l'agriculture en particulier. Hausse globale des températures, bouleversement des régimes hydriques, augmentation de la fréquence des événements erratiques, ou encore augmentation des variations interannuelles mettent à l'épreuve la production agricole. De nombreux leviers sont mobilisables, parmi lesquels la génétique végétale (nouvelles espèces, nouvelles variétés...). Les travaux des Assises de l'Eau puis du Varenne agricole de l'eau et de l'adaptation au changement climatique ont dressé ce constat et initié des plans d'actions ciblant notamment les filières végétales.

Par ailleurs, la base réglementaire européenne encadrant la mise en marché de semences et plants est en cours de révision. La proposition de la Commission européenne, publiée le 5 juillet 2023, ambitionne d'explicitier l'adaptation au changement climatique comme critère de valeur culturelle et d'utilisation durable, épreuve qui serait imposée à toutes les espèces soumises à l'inscription au catalogue et non plus uniquement aux espèces agricoles et à la vigne.

En tant que Commission administrative à caractère consultatif, le CTPS est chargé de l'établissement du catalogue officiel des espèces et variétés de plantes cultivées. Les Sections du CTPS mettent en œuvre des Règlements Techniques d'inscription au catalogue, et proposent des évolutions concernant les expérimentations à réaliser, les caractères à évaluer et les règles de décision pour inscrire

aujourd'hui les variétés de demain. Ces travaux opérationnels s'inscrivent en pleine cohérence avec les ambitions portées par le plan Semences et Plants pour une Agriculture Durable 2, qui reconnaît explicitement le rôle que jouent les variétés, semences et plants dans l'adaptation au changement climatique. Toutefois, peu de Règlements Techniques d'inscription ont été modifiés pour anticiper le bouleversement climatique auquel seront confrontés les producteurs dans les prochaines années, malgré l'intérêt manifesté pour cette thématique par de nombreuses Sections. Des réflexions sont néanmoins initiées au sein de certaines Sections, mais ces initiatives éparses et limitées en nombre d'espèces interrogent quant aux méthodes à déployer pour prendre en charge cette dimension nouvelle dans la définition des matériels génétiques recherchés et leur évaluation.

Pourtant, des projets de recherche extrêmement conséquents sont portés au niveau de la recherche académique, de nombreux travaux sont en cours dans les Instituts Techniques Agricoles, les Chambres d'Agriculture, chez les obtenteurs, au GEVES... Un matériau extrêmement riche est donc à mobiliser, que ce soit au niveau français, européen, ou international, pour guider la stratégie du CTPS en matière d'évaluation variétale dans le contexte de l'adaptation au changement climatique.

*« La sécurité alimentaire et le changement climatique figurent au nombre des plus grands défis que le monde doit relever. Associé à d'autres facteurs, le changement climatique compromet déjà les progrès récemment accomplis en matière de lutte contre la faim et la malnutrition. [...] La nécessité de continuer à produire des aliments malgré le changement climatique est un objectif fondamental de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC). L'accord de Paris de 2015 souligne par ailleurs « la priorité fondamentale consistant à protéger la sécurité alimentaire et à venir à bout de la faim, et la vulnérabilité particulière des systèmes de production alimentaire aux effets néfastes des changements climatiques » <sup>[B1]</sup>.*

### **Questions posées**

Ainsi, l'éclairage du Comité Scientifique du CTPS est sollicité sur la manière dont les Sections du CTPS pourraient être plus pro-actives dans la prise en compte de l'adaptation au changement climatique dans leurs travaux d'évaluation variétale. Cet éclairage est attendu sur le contexte abiotique.

Concrètement, en ciblant quelques espèces (pérennes vs annuelles, espèces de printemps vs espèces d'hiver, espèces à examen VATE obligatoire ou actuellement sans VATE...) et en s'appuyant sur de nombreux résultats de travaux de recherche à disposition ou projets en cours, le Comité Scientifique pourrait :

- faire un état des lieux de la contribution de la sélection (amélioration variétale, déploiement de nouvelles espèces, mélanges inter ou intraspécifiques...) à une meilleure adaptation des cultures au changement climatique, et analyser la façon dont la prise en compte de la transition agroécologique permet, ou non, d'anticiper l'adaptation au changement climatique.
- aborder la manière dont le CTPS devrait prendre ce sujet en charge, notamment en termes de stratégie d'évaluation (traits contribuant directement ou indirectement à une adaptation au changement climatique, méthode d'évaluation, localisation des essais, partenariats...) et le cas échéant de règles de décision.

### **Périmètre de la saisine**

La saisine concerne l'ensemble du territoire français, c'est-à-dire la métropole mais également les territoires ultra-marins. Le Comité Scientifique souhaite aborder principalement les problématiques liées aux stress abiotiques (facteurs liés au milieu), mais les stress biotiques seront également abordés dans ce rapport à travers la question de la capacité à anticiper des stress biotiques nouveaux, et la capacité de la plante à maintenir une résistance stable aux stress biotiques sous des contraintes abiotiques plus fortes. La saisine se focalisera sur la notion « d'adaptation » au changement climatique,

mais il conviendra d'analyser si les orientations envisagées vont ou non dans le sens d'une « atténuation » du changement climatique (stratégie gagnant-gagnant).

En effet, l'adaptation et l'atténuation ne doivent pas être considérées comme des approches s'excluant ou incompatibles : chacune couvre des aspects complémentaires d'une stratégie globale. L'atténuation opère sur une échelle de temps long et nécessite une approche coordonnée à l'échelle mondiale pour réduire progressivement les émissions de gaz à effet de serre au niveau planétaire. L'adaptation correspond quant à elle à des actions menées à court terme et principalement au niveau local et dépend des particularités locales (vulnérabilité, capacité de résilience...).

L'absence de mesures d'atténuation ou l'inadéquation de ces dernières peut accroître le besoin d'adaptation et, par conséquent, augmenter leurs coûts relatifs<sup>[B1]</sup>.

Ce rapport se divise en cinq parties pour appréhender au mieux le sujet dans sa globalité. La première partie dresse le constat du changement climatique et adresse les principaux impacts sur l'agriculture, tout en soulignant les enjeux sociétaux des prochaines décennies qui viennent compléter l'image du futur de l'agriculture française. Dans une seconde partie sont présentés les apports de la sélection, passés et futurs, et la place importante des ressources génétiques dans la prise en compte du changement climatique. La troisième partie permet de réaliser un état des lieux de la prise en compte du changement climatique par les différentes sections du CTPS dans leurs travaux d'inscription de nouvelles variétés au catalogue français. Dans la quatrième partie, il est question de la façon de qualifier le potentiel d'adaptation des variétés au changement climatique et de la manière de prendre en compte les aléas climatiques dans les essais menés dans le cadre de l'inscription des variétés. Enfin, la dernière partie s'efforce d'apporter des éléments de réponse aux interrogations des sections et de lever les freins exprimés. Pour les parties 2 à 5, le Comité Scientifique appuie ses réflexions sur un questionnaire envoyé aux sections et aux commissions inter-sections afin de recueillir un certain nombre d'éléments pour éclairer les discussions.

### **Déroulement de la saisine**

Cette saisine s'est déroulée d'octobre 2023 à octobre 2024.

Au mois d'octobre 2023, une journée de lancement de la saisine a été consacrée à une présentation par Nathalie de Noblet, climatologue au CEA, sur le changement climatique et le contexte dans lequel s'inscrit l'agriculture de demain. En novembre, la session a porté sur le périmètre de la saisine, et deux sections du CTPS ont été auditionnées pour présenter les réflexions en cours autour de la question du changement climatique, pour les espèces Arbres forestiers (présentation d'Alain Berthelot) et Maïs (Présentation de Valérie Uyttewaal sur la prise en compte du changement climatique pour l'évaluation des variétés de maïs à l'inscription). Le CS du CTPS a ensuite travaillé à la préparation d'un formulaire à destination des sections et commissions inter-sections du CTPS, qui a été adressé mi-décembre à l'ensemble des destinataires. La réunion suivante a eu lieu en janvier 2024 et deux sessions de travail ont porté sur les traits à considérer et les méthodes d'évaluation à associer, ainsi que sur la prise en compte des aléas dans les réseaux d'essais. Mi-mars 2024, une demi-journée d'échange a été organisée pour une présentation de Pierre Martre, INRAE, sur le thème « modélisation et inscription variétale en lien avec le changement climatique ». Le 20 mars 2024 s'est tenu un séminaire qui a rassemblé les membres du Comité Scientifique, les présidents et les secrétaires techniques des sections et commissions inter-sections du CTPS, avec plusieurs temps forts : tout d'abord, une présentation de Franck Prunus, Directeur des services à la filière chez SEMAE, exposant une réflexion initiée par SEMAE sur les conséquences du dérèglement climatique sur la production de semences ; puis une synthèse des retours des questionnaires qui a alimenté une réflexion collective autour de la cible pour l'innovation face au changement climatique ; enfin, trois ateliers de réflexions ont été proposés aux participants sur les thèmes « résilience face au changement climatique », « diversification dans le contexte du changement climatique » et « opérationnalisation de la cible pour l'innovation variétale face au changement climatique ». Fin mai 2024, les membres du CS du CTPS ont travaillé autour des éléments génériques pour préciser la cible de l'innovation variétale et sur la

qualification du potentiel des variétés. En juillet 2024, le CS du CTPS a poursuivi ces échanges autour des notions de stabilité, de résilience et de valorisation des aléas, et une présentation des résultats obtenus dans le projet Optirés a été faite par Julie Gombert, Responsable Nationale Etudes VATE au GEVES. Les premières recommandations ont été émises lors de cette réunion, et leur rédaction s'est poursuivie lors de la dernière session de travail du CS du CTPS en septembre 2024.

## Méthodologie – questionnaire à l’attention des sections et commissions inter-sections du CTPS

Afin d’appréhender au mieux les enjeux et les impacts du changement climatique tels qu’ils sont perçus par l’ensemble des sections et des commissions inter-sections du CTPS, un questionnaire a été établi et envoyé afin de recueillir leurs réflexions, qui ont alimenté la suite de la réflexion du CS (trame jointe en **Annexe 2**).

Le questionnaire est inspiré d’autres études qui ont été utilisées pour établir, à dire d’experts :

- Les **principaux traits**, déjà existants ou nouveaux, qui seront nécessaires pour faire face au changement climatique dans la zone sub-saharienne pour six cultures d’intérêt (millet perlé, sorgho, maïs, arachide, niébé et haricot commun) <sup>[B2]</sup>. Un questionnaire avait alors été envoyé à 588 parties prenantes, auxquelles on a demandé :
  - o D’évaluer différents facteurs (liste fournie) susceptibles d’entraîner des changements dans l’agronomie ou les systèmes de culture dans le cadre des climats futurs
  - o D’établir la probabilité d’adoption d’innovations dans la conduite de culture en réponse au changement climatique
  - o D’évaluer le degré d’innovation et l’impact potentiel de caractéristiques ou de traits dans les programmes de sélection dans le cadre du changement climatique
- **Les traits et mesures adaptatifs** observés depuis une vingtaine d’années, ainsi que ceux attendus, en réponse au changement climatique en Europe, pour cinq cultures d’intérêt (blé, colza, maïs, pomme de terre et vigne) <sup>[B3]</sup>. Un questionnaire avait alors été envoyé à 122 experts, représentant 6 zones climatiques (Boréale et baltique, Atlantique Nord, Continentale et Alpes du sud, Côte Atlantique, Europe centrale et Méditerranée), auxquels on a demandé :
  - o D’évaluer différentes pratiques culturelles (liste fournie) susceptibles d’avoir évolué dans les différentes zones géographiques depuis les années 1990, et d’évaluer l’importance du changement climatique dans ces changements de pratiques
  - o D’évaluer une liste de mesures adaptatives (liste fournie), par espèce et par zone, en réponse au changement climatique, déjà observées
  - o D’évaluer différentes pratiques culturelles (liste fournie) susceptibles d’évoluer en réponse au changement climatique à venir, par espèce et par zone

Le questionnaire réalisé dans le cadre de la saisine a comporté 11 questions sur :

- Les risques climatiques identifiés et leur prise en considération dans les essais DHS et/ou VATE (notations, sécurisation, pilotage actif ...)
- L’évolution des pratiques culturelles chez les producteurs et dans les dispositifs du réseau d’évaluation CTPS
- Les difficultés rencontrées en lien avec le changement climatique
- Les anticipations en termes de traits de sélection
- Le potentiel d’atténuation du changement climatique des espèces de chaque section
- Les potentielles opportunités apportées par le changement climatique
- Les craintes, verrous ou freins limitant la prise en compte du changement climatique dans les travaux d’évaluation du CTPS
- Les outils (OAD, modèles de culture, travaux de recherche) mobilisables en lien avec le changement climatique
- Les impacts du changement climatique sur la conservation *in situ* des ressources phylogénétiques
- La prise en compte des attentes et défis sociétaux, et les risques associés

Les réponses à ce questionnaire sont venues étayer, appuyer et enrichir les réflexions présentées dans les parties suivantes du rapport.

## WP1 : État des lieux, projections climatiques et enjeux

### A. Origines et causes du changement climatique

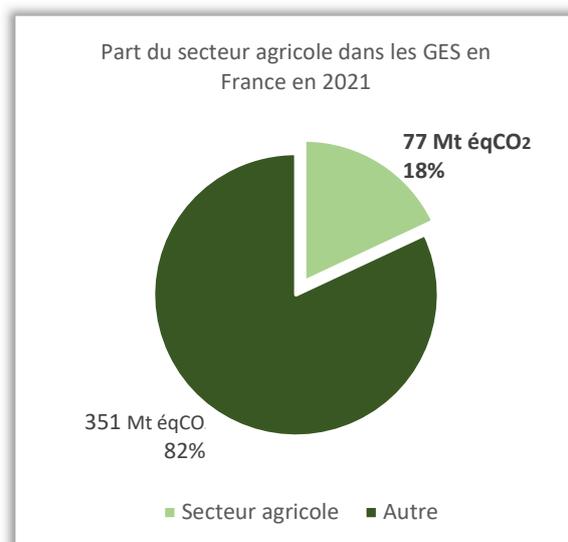
Le système climatique évolue avec le temps, sous l'effet de sa propre dynamique interne mais également en raison de facteurs externes naturels (éruptions volcaniques, variations de l'activité solaire...) et anthropiques (variations de la composition de l'atmosphère via l'augmentation de la concentration en gaz à effet de serre (GES), changement d'affectation des terres via la déforestation...). Le changement climatique est causé par une forte concentration dans l'atmosphère des GES, liée à l'activité humaine : CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O. Le pouvoir réchauffant des gaz CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O est très supérieur à celui du CO<sub>2</sub>, mais leurs durées de vie sont plus courtes. Ces gaz piègent l'énergie qui est normalement renvoyée dans l'atmosphère. Cette énergie se retrouve bloquée sur Terre, et 91% de cette énergie est piégée dans les océans. Pour tenter de rétablir l'équilibre énergétique entre l'énergie reçue et l'énergie renvoyée, le système augmente le rayonnement thermique, provoquant ainsi le changement climatique<sup>[C1]</sup>.

Les impacts du changement climatique sont multiples et globaux (augmentation du contenu en vapeur d'eau dans l'atmosphère (+7% de vapeur d'eau par degré Celsius gagné), circulation des courants atmosphériques modifiée, augmentation du niveau des mers et des océans, augmentation de l'acidification des océans, disparition des glaciers, progression vers le Nord de la limite des arbres ...) mais également locaux (augmentation de la température, de la variabilité inter-annuelle, des régimes de pluviométrie, de l'ensoleillement)<sup>[C1]</sup>.

#### 1. Implication du secteur agricole dans les émissions de GES

Si l'agriculture est un secteur impacté par le changement climatique, il est aussi un des secteurs à son origine, via l'émission directe de GES et le changement d'affectation des sols (principalement, la déforestation). L'agriculture est le plus gros contributeur aux émissions GES autres que le CO<sub>2</sub>, à savoir le méthane et le protoxyde d'azote<sup>[B4]</sup>. La contribution du secteur agricole, forestier et du changement d'usage des sols aux émissions mondiales de chacun des trois GES a été chiffrée : elle est de 13% pour le CO<sub>2</sub>, 44% pour le CH<sub>4</sub> et de 82% pour le N<sub>2</sub>O<sup>[C1]</sup>. En 2019, environ 44% de la contribution agricole européenne à l'émission des gaz à effet de serre était le fait de seulement 3 Etats : la France, l'Allemagne et le Royaume-Uni. Il faut toutefois souligner que ces 3 Etats représentent 35% de la surface agricole de l'Europe (respectivement, 16%, 9% et 10%)<sup>[B4]</sup>.

En France, les émissions de GES du secteur agricole (hors changement d'affectation des terres) sont estimées à 18% des émissions totales, avec 77 Mt éqCO<sub>2</sub> en 2021 (avec une incertitude liée aux hypothèses simplificatrices nécessaires à l'agrégation des données des exploitations agricoles). Le méthane et le protoxyde d'azote constituent 85% des émissions de GES du secteur agricole, et l'agriculture représente respectivement 69% et 87% des émissions globales en France en 2021 pour ces deux gaz à effet de serre (cf. [Figure 1](#) et [Figure 2](#)). Ces deux gaz ayant un potentiel de réchauffement global (PRG) plus élevé que le CO<sub>2</sub> (x 28 pour le CH<sub>4</sub>, x 265 pour le N<sub>2</sub>O), ils font l'objet d'une attention



**Figure 1:** Part du secteur agricole dans les émissions de gaz à effet de serre en France en 2021 - Source : B5

particulière : ainsi, lors de la COP 26 en 2021, la France, comme plus de cent pays, s'est engagée à baisser de 30% les émissions mondiales de méthane d'ici 2030 par rapport à leur niveau de 2020<sup>[B5]</sup>.

Les émissions de l'élevage représentent 46 MTéqCO<sub>2</sub> (millions de tonnes en équivalent CO<sub>2</sub>) en 2021, soit 59% des émissions de l'agriculture, et se composent à 93% de méthane. Les émissions des cultures représentent 21 MTéqCO<sub>2</sub> en 2021, soit 27 % des émissions du secteur agricole, composées à 90% du protoxyde d'azote. Le recours aux engrais et amendements minéraux, et dans une moindre mesure organique, compte pour près de 50% des émissions des cultures (soit 3% des émissions nationales tous secteurs confondus). L'utilisation d'engrais azotés minéraux est également responsable d'émissions indirectes lors de leur synthèse par le procédé Haber-Bosch, à partir de ressources fossiles (gaz naturel). On estime qu'en moyenne, seule la moitié de l'azote minéral appliqué est utilisée par les plantes. Le reste est perdu par lixiviation des sols majoritairement, dans la génération de particules fines ou dans la transformation en N<sub>2</sub>O<sup>[B5]</sup>.

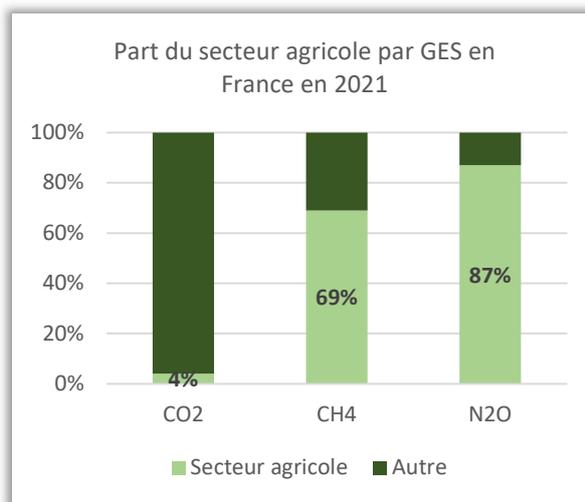


Figure 2 : Part du secteur agricole par GES en France en 2021 – Source : B5

Les émissions de GES de l'agriculture française ont diminué de 13% sur la période 1990-2021. Cette évolution à la baisse se constate au niveau des cultures (-15%), de l'élevage (-15%) et des émissions liées aux engins et chaudières agricoles (-4%). La baisse concernant les cultures est liée principalement à la diminution de la fertilisation azotée minérale. Il faut noter que l'utilisation d'engrais azotés, minéral et organique, a diminué entre 1990 et 2016, notamment avec la directive « Nitrates » de la Commission européenne<sup>[B4]</sup>.

Le stockage du carbone dans les sols agricoles est affecté en premier lieu par les changements d'usage des sols. Les terres cultivées déstockent significativement moins du fait de la baisse des conversions de prairies en terres cultivées ces dernières années. Les prairies qui restent prairies contribuent faiblement au stockage. En revanche, lorsqu'elles sont converties en cultures ou artificialisées, elles deviennent fortement émettrices. Par ailleurs, lorsqu'elles sont converties en forêt, elles peuvent stocker beaucoup plus de carbone dans leur biomasse (voir la Figure 3).

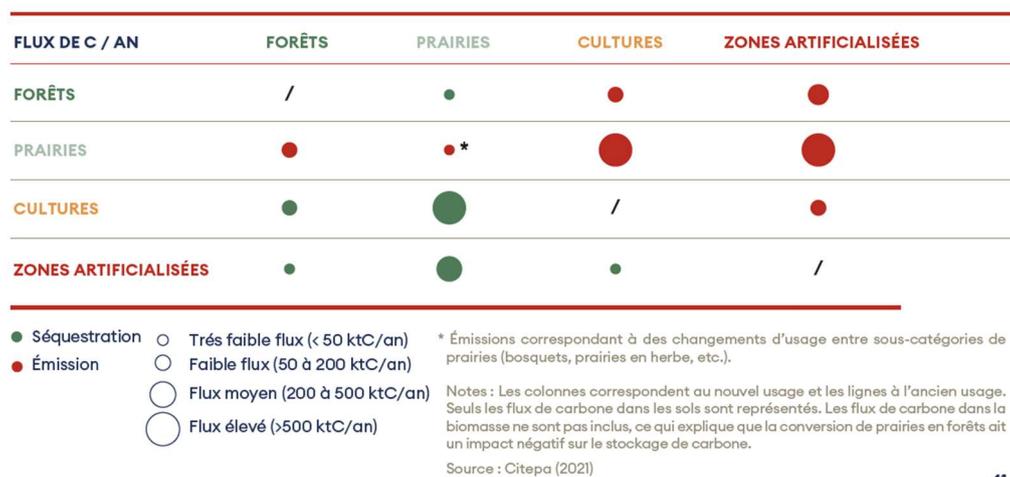
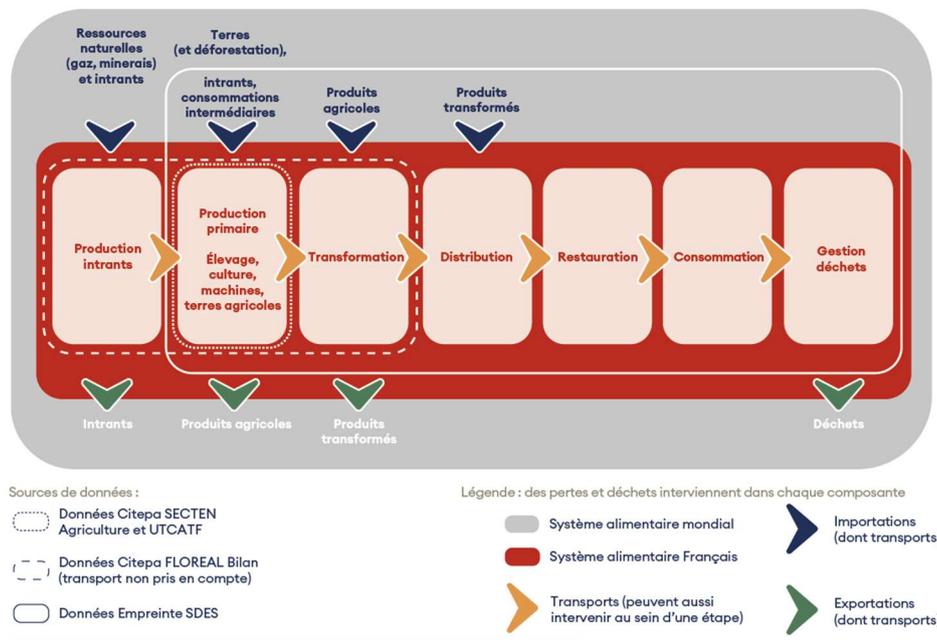


Figure 3 : Flux de carbone dans les sols liés aux changements d'usages des sols en France métropolitaine en 2017 – Source : B5

## 2. Implication du système alimentaire dans les émissions de GES

Le système alimentaire (voir Figure 4) génère lui aussi des émissions de GES à travers la transformation, la distribution et la consommation de nourriture. Les industries agroalimentaires ont ainsi émis directement 9 Mt éqCO<sub>2</sub> en 2021<sup>[B5]</sup>.



**Figure 4** : Représentation schématique des composantes du système alimentaire - Source : B5

En 2017, l’empreinte carbone de l’alimentation des Français est estimée à 140 MTéqCO<sub>2</sub>\*, ce qui représente 2,1 TéquCO<sub>2</sub> par habitant. L’empreinte carbone totale de la France pour la même année est de 633 MTéquCO<sub>2</sub> (9,5 TéquCO<sub>2</sub> par personne) : l’alimentation représente ainsi 22 % de l’empreinte carbone de la France. Ce chiffre comprend les émissions de l’agriculture, mais également celles issues du système alimentaire présenté ci-dessus (importations comprises). Spécifiquement, la France importe 20% de son alimentation, ce qui représente 46% des émissions alimentaires (en détail, 52% des émissions alimentaires importées sont des denrées directement destinées au consommateur, et 48% sont des matières premières ou des produits qui entrent en amont dans le système alimentaire). Il est à noter que la part importée des volumes commercialisés atteint 40 à 50 % pour les légumes les plus consommés, alors que la France est auto-suffisante en blé tendre ou encore en lait<sup>[B5]</sup>.

L’ensemble des territoires ultramarins présente une faible couverture de leur alimentation : seuls environ 20% de ce qui est consommé est produit sur place. Pour lutter contre le changement climatique, l’une des solutions importantes est de produire localement, ce qui limitera les émissions carbone liées aux importations. Il s’agit de la première démarche à entreprendre à l’échelle des territoires : un ancrage de ces systèmes alimentaires dans le territoire, selon Harry Archimède, directeur de recherches à INRAE. Cependant, l’autonomie alimentaire ne sera pas atteinte en 2030, parce que certaines filières n’existent pas, ou sont très peu développées, comme la filière céréales. En revanche, il semble possible d’augmenter le taux de couverture en fruits et légumes (Guadeloupe : taux actuel de 45%, objectif de 65% en 2030 ; à la Réunion, taux actuel de 65%, objectif de 80 %, en 2030), comme l’a expliqué Arnaud Martrenchar, Délégué interministériel à la transformation agricole des Outre-mer<sup>[B6]</sup>.

## B. Situation actuelle et perspectives

Selon le rapport du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) publié en 2023<sup>[B7]</sup>, la température moyenne à la surface du globe a augmenté de +1.15°C sur la période 2013-2022, en comparaison avec la période 1850-1900. En France, cette augmentation de température est même calculée à +1.9°C sur la dernière décennie (2013-2022)<sup>[S1, B8]</sup>. La moitié du territoire français connaît une baisse de pluviométrie depuis 60 ans. Par ailleurs, l'évapotranspiration est en forte augmentation, surtout au printemps, mais en toutes saisons de manière générale<sup>[C1]</sup>.

### 1. Scénarios climatiques, mode d'emploi

Dans les années 2010, à la demande des experts du GIEC, la communauté scientifique a imaginé plusieurs scénarios climatiques, les **RCP** (*Representative Concentration Pathways*) (voir [Figure 5](#)). Ces scénarios sont basés sur le forçage radiatif, c'est-à-dire sur un changement du bilan radiatif (différence entre le rayonnement entrant et le rayonnement sortant) au sommet de la troposphère, dû à la concentration des gaz à effet de serre. Quatre scénarios sont envisagés : RCP2.6 (le scénario le plus optimiste), RCP4.5, RCP6.0 et RCP8.5 (le scénario le plus pessimiste)<sup>[S2]</sup>.

Nom	Forçage radiatif	Concentration (ppm)
RCP8.5	>8,5W.m-2 en 2100	>1370 eq-CO2 en 2100
RCP6.0	~6W.m-2 au niveau de stabilisation après 2100	~850 eq-CO2 au niveau de stabilisation après 2100
RCP4.5	~4,5W.m-2 au niveau de stabilisation après 2100	~660 eq-CO2 au niveau de stabilisation après 2100
RCP2.6	Pic à ~3W.m-2 avant 2100 puis déclin	Pic ~490 eq-CO2 avant 2100 puis déclin

**Figure 5** : Tableau d'équivalences entre les scénarios climatiques (RCP), le forçage radiatif et la concentration en ppm (partie par millions) – Source : S2

Dans le cadre du 6<sup>ème</sup> rapport du GIEC, ces scénarios climatiques ont été complétés par cinq « récits » qui décrivent les voies de développement de la société, ce qui permet l'élaboration de nouveaux scénarios : les **SSP** (*Shared Socioeconomic Pathways*), ou Trajectoires Socioéconomiques Communes. Les scénarios sont fonction de la réaction de la société aux défis pour l'atténuation du changement climatique et aux défis pour l'adaptation au changement climatique.

Ainsi, le SSP1 correspond à la « voie durable », ou « voie verte », avec une société résiliente, en capacité de résoudre les défis à la fois pour l'atténuation et pour l'adaptation au changement climatique.

Le SSP2 correspond à la « voie médiane », avec une poursuite des tendances socioéconomiques actuelles. La capacité de résolution des défis d'atténuation et d'adaptation au changement climatique est moyenne.

Le SSP3 est un scénario de « fragmentation », avec une augmentation des rivalités régionales, rendant la résolution des défis pour l'atténuation et l'adaptation au changement climatique très difficile.

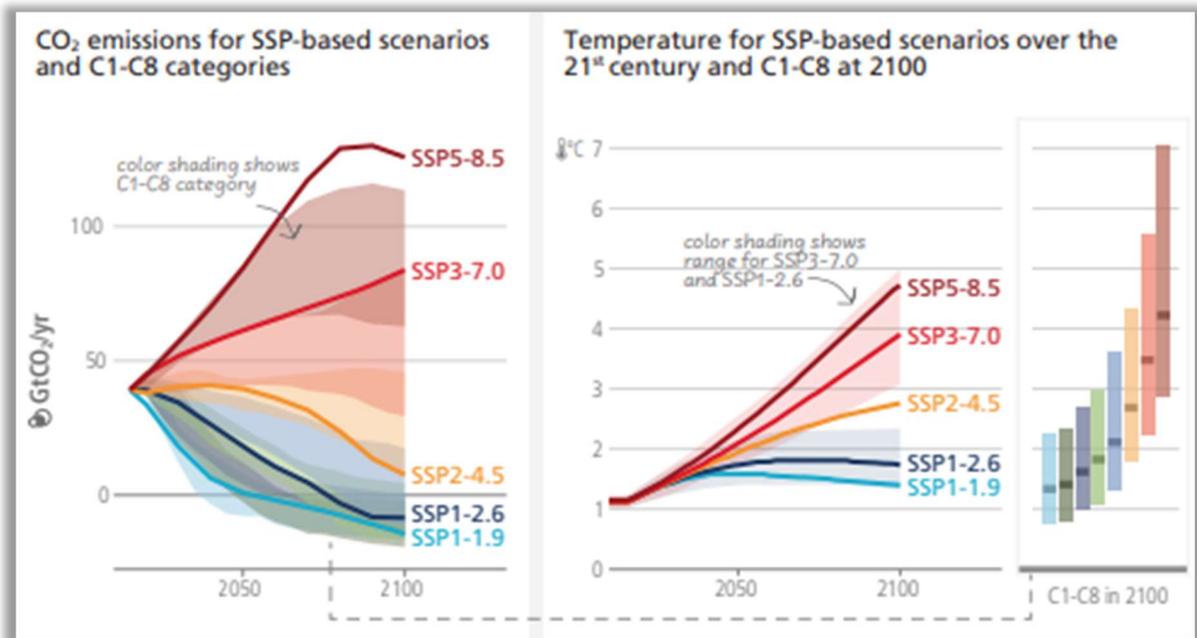
Dans le SSP4, le scénario correspond à l'exacerbation des « inégalités » entre les régions du monde. Au global, les sociétés parviennent à répondre aux défis de l'atténuation du changement climatique mais rencontrent des difficultés à répondre à ceux concernant l'adaptation.

Enfin, le SSP5 correspond à un « développement conventionnel » dans lequel le développement de la société demeure basé sur les énergies fossiles. La résolution des défis pour l'atténuation du changement climatique est compliquée, mais des réponses sont développées pour l'adaptation au changement climatique.

Les scénarios climatiques (RCP) et socioéconomiques (SSP) ont été combinés sous forme matricielle et 5 nouveaux scénarios ont été retenus pour servir de base aux projections des modèles climatiques :

- SSP1-1.9
- SSP1-2.6
- SSP2-4.5
- SSP3-7.0
- SSP5-8.5

La [Figure 6](#) ci-dessous présente les cinq nouveaux scénarios selon l'évolution des émissions annuelles de CO<sub>2</sub> (à gauche), ainsi que l'augmentation des températures jusqu'en 2100 pour chacun de ces scénarios (à droite).



**Figure 6 :** Nouveaux scénarios définis dans le 6<sup>ème</sup> rapport du GIEC combinant scénarios climatiques et socioéconomiques  
– Source : B7

Les accords de Paris, adoptés en décembre 2015, correspondent au scénario SSP1-1.9, qui ne pourra être atteint que si les émissions de CO<sub>2</sub> chutent drastiquement d'ici 2050 – cela limiterait alors le réchauffement planétaire à +1.5°C.

Or, étant donné les émissions de gaz à effet de serre actuelles, il est déjà certain qu'en 2030, les températures moyennes à la surface du globe seront de +1.5 à +2°C en comparaison avec la période 1850-1900, ce qui correspond à +3.0°C en France<sup>[C1]</sup>.

Actuellement, les gouvernements affichent un engagement qui correspond au scénario SSP2-4.5, avec un pic des émissions de CO<sub>2</sub> en 2050 puis une baisse progressive – avec un réchauffement des températures compris entre +2.7°C et +3.2°C en 2100<sup>[B7]</sup>.

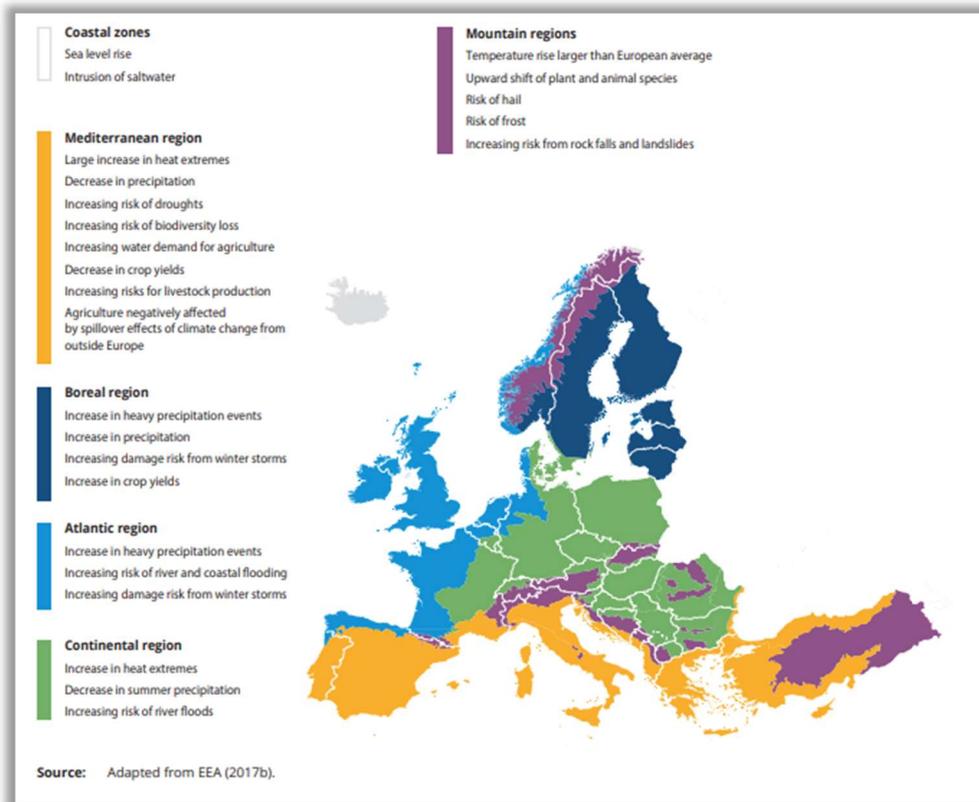
Cependant, la trajectoire actuelle semble plutôt conduire à une élévation de la température de l'ordre de +3.2 à +3.5°C en 2100 à l'échelle planétaire (à l'échelle de la France métropolitaine, cela correspondrait à 4.8°C à 5.3°C)<sup>[C1]</sup>.

## 2. Projections : quels climats en 2050 ?

Le continent européen présente des zones climatiques contrastées qui vont évoluer différemment dans le contexte du changement climatique (voir [Figure 7](#)). Le territoire métropolitain présente à lui seul 4 types de climat<sup>[B4]</sup> :

- La région Atlantique, qui va connaître une augmentation des fortes précipitations, du risque d'inondations, et des dégâts causés par les tempêtes hivernales

- La zone continentale, à l'Est, qui va voir les températures chaudes extrêmes en augmentation, une diminution des précipitations et un risque d'inondations fluviales accru
- La zone Méditerranéenne, qui va connaître une forte augmentation des températures chaudes, une diminution des précipitations, un risque accru de sécheresse, une demande accrue en irrigation
- Les zones de haute montagne (Pyrénées et Alpes), qui vont faire face à une augmentation des températures plus importantes que le reste de l'Europe, et dont la limite des espèces va s'élever. Les risques de gel, de grêle et de glissement de terrain seront plus importants à l'avenir.



**Figure 7** : Carte des différentes zones climatiques du continent européen et les principaux impacts du changement climatique sur le secteur agricole – Source : B4

En s'appuyant sur les scénarios définis par le GIEC, il est possible d'établir des simulations du climat futur à partir de modèles informatiques, développés par les chercheurs impliqués dans le projet Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) mené par le Programme Mondial de Recherche sur le Climat (PMRC). Ainsi, le projet **Drias**<sup>[52]</sup> (*Donner accès aux scénarios climatiques Régionalisés français pour l'Impact et l'Adaptation de nos Sociétés et environnement*) a été développé par Météo-France, en collaboration avec les chercheurs des laboratoires français du CERFACS, CNRM-GAME et IPSL, et il met à disposition des projections climatiques pour le territoire français (métropole principalement, mais le site est régulièrement enrichi avec des données élargies aux territoires ultramarins).

Le jeu de données **DRIAS-2020** intègre des données issues de l'ensemble Euro-CORDEX, qui fournit des simulations de scénarios climatiques pour l'Europe. L'ensemble DRIAS-2020 est constitué de 12 simulations historiques qui couvrent la période 1971-2005 (période de référence), et 30 projections du climat futur jusqu'en 2100 selon 3 scénarios d'émissions de gaz à effet de serre : 12 projections pour le scénario SSP5-8.5, 10 pour le scénario SSP2-4.5 et 8 pour le scénario SSP2-2.6.

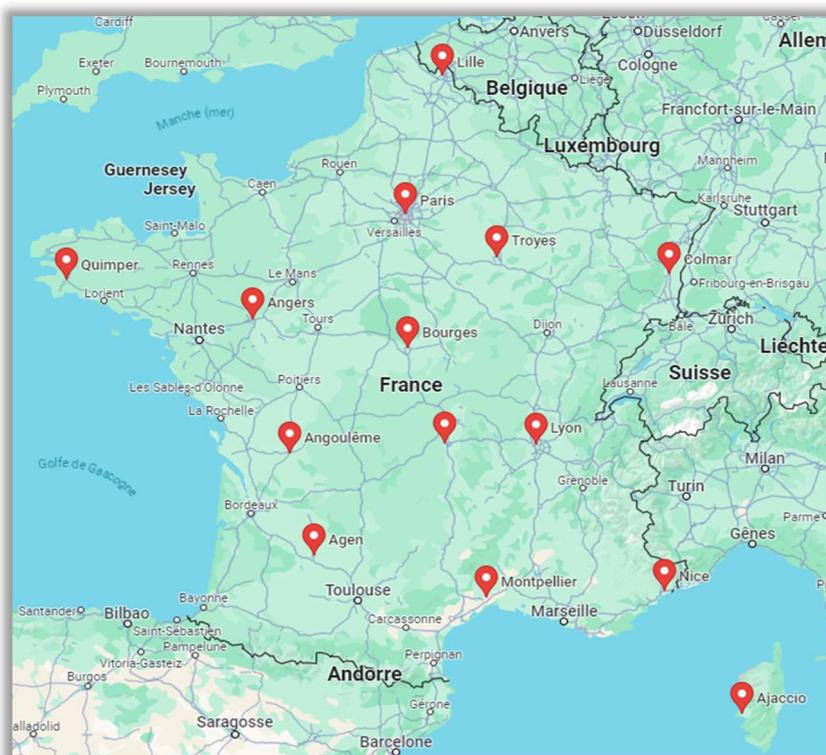
Le jeu de données **TRACC-2023** (Trajectoire de Réchauffement de Référence pour l'Adaptation au Changement Climatique) contient 17 simulations historiques qui couvrent la période 1971-2005 (période de référence), et 41 projections du climat futur jusqu'en 2100 selon 3 scénarios d'émissions

de gaz à effet de serre : 17 projections pour le scénario SSP5-8.5, 9 pour le scénario SSP2-4.5 et 10 pour le scénario SSP2-2.6.

Grâce à ces jeux de données, il est possible de projeter un certain nombre d'indicateurs climatiques en choisissant un scénario climatique, un ou plusieurs modèles de prédiction et un horizon temporel.

Ici, le choix a été fait de baser notre projection sur le scénario SSP2-4.5 (engagement des gouvernements), car les trajectoires SSP2-4.5 et SSP3-7.0 ont un impact similaire sur le climat de 2050 (ce qui n'est plus le cas pour les projections en 2100), en utilisant, pour chaque indicateur présenté, la médiane de l'ensemble multi-modèles issu du jeu de données TRACC-2023 lorsque cela est possible, ou à défaut la médiane de l'ensemble multi-modèles issu du jeu de données DRIAS-2020, pour l'horizon 2050.

Pour projeter les climats de demain à l'échelle du territoire métropolitain, 14 villes ont été retenues afin de couvrir au mieux les différentes zones : Lille, Paris, Quimper, Angers, Troyes, Colmar, Bourges, Angoulême, Clermont-Ferrand, Lyon, Agen, Montpellier, Nice et Ajaccio (voir la Figure 8 ci-dessous).

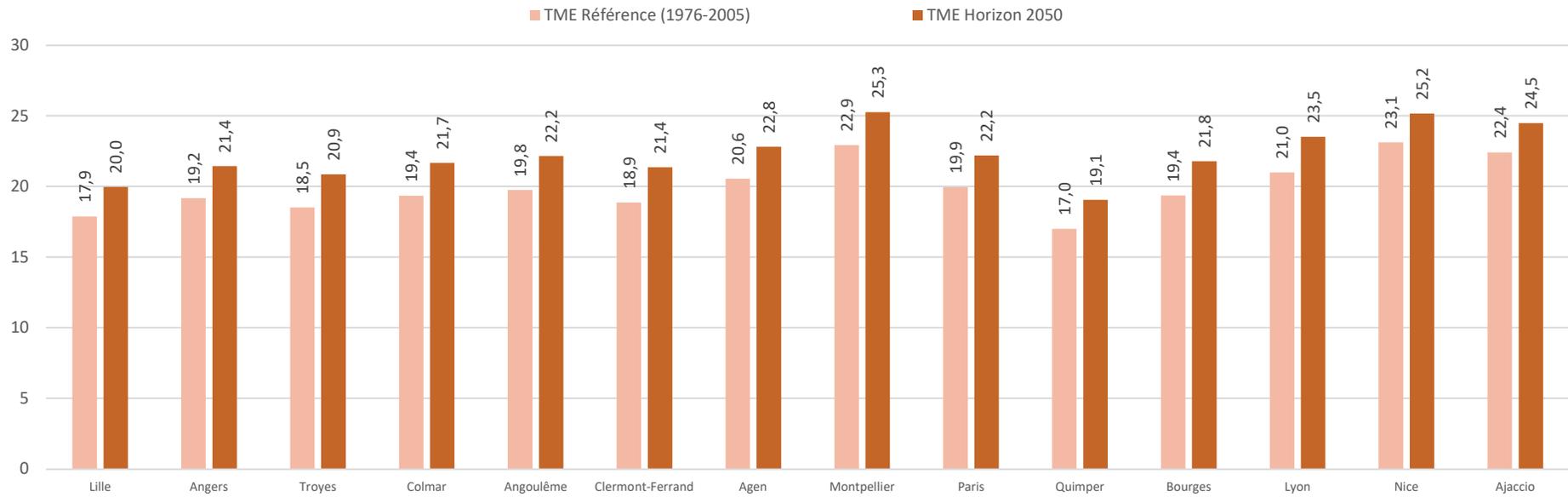


**Figure 8** : Localisation des 14 villes de France métropolitaine utilisée pour la projection des indicateurs climatiques

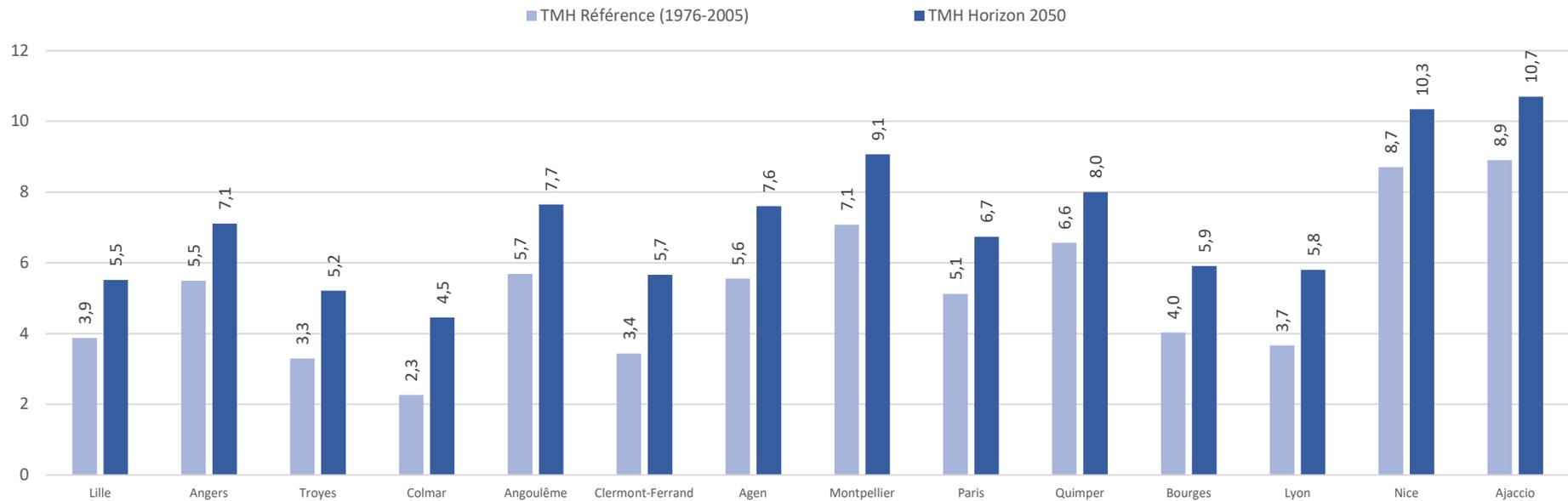
La liste des différents indicateurs est présentée dans le tableau ci-dessous, et les données sont présentées dans la Figure 9 :

Indicateur	Abréviation	Jeu de données
Température moyenne estivale	TME	TRACC-2023
Température moyenne hivernale	TMH	TRACC-2023
Cumul de précipitation en été (en mm)	CPE	TRACC-2023
Nombre de jours de gel	NJG	DRIAS-2020
Nombre maximum de jours secs consécutifs en été (précipitations < 1mm)	JSCE	DRIAS-2020
ETP cumulée en mm pour la période estivale	ETPE	DRIAS-2020

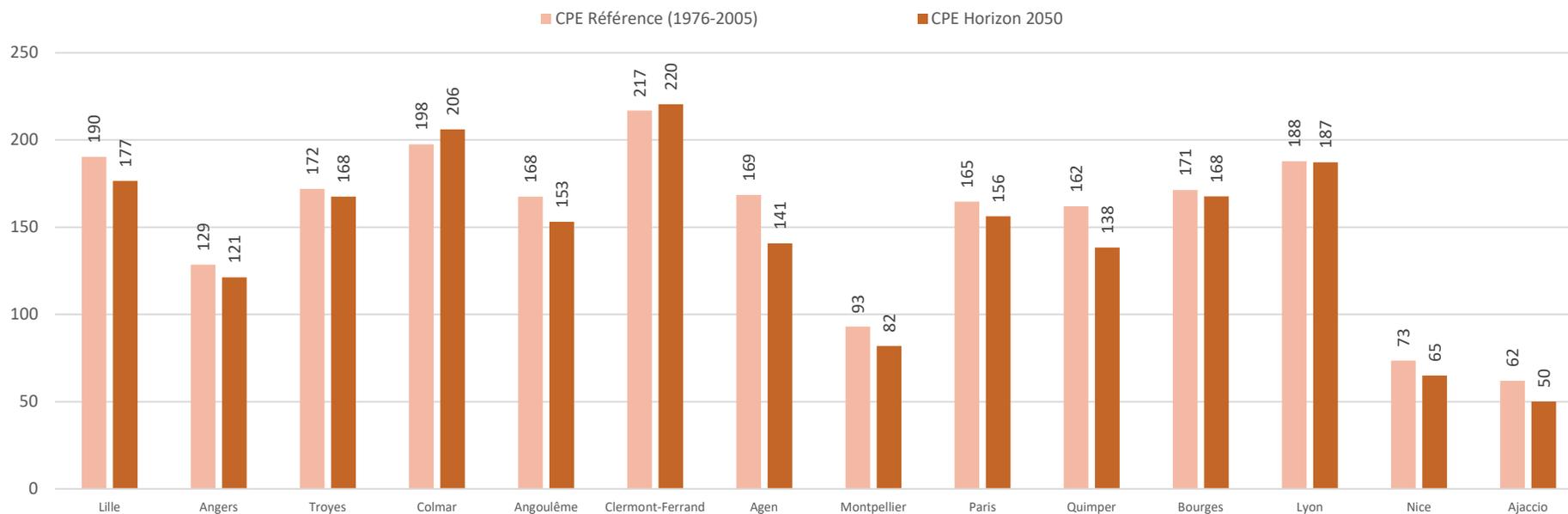
### A. Estimation de la température moyenne estivale (en °C)



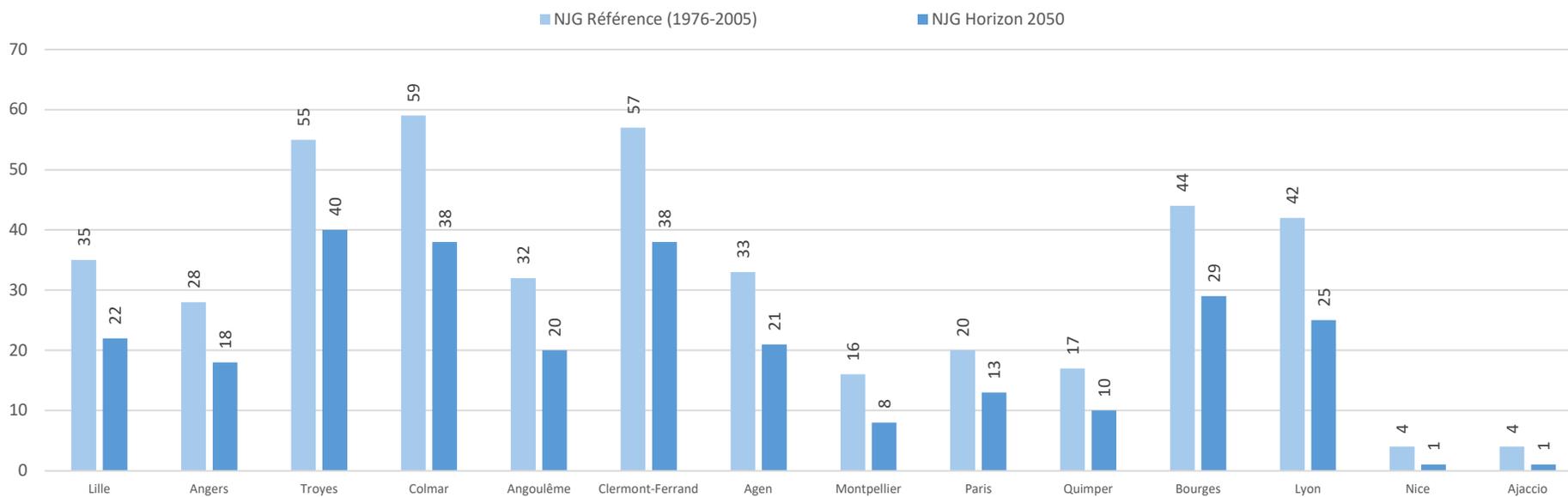
### B. Estimation de la température moyenne hivernale (en °C)



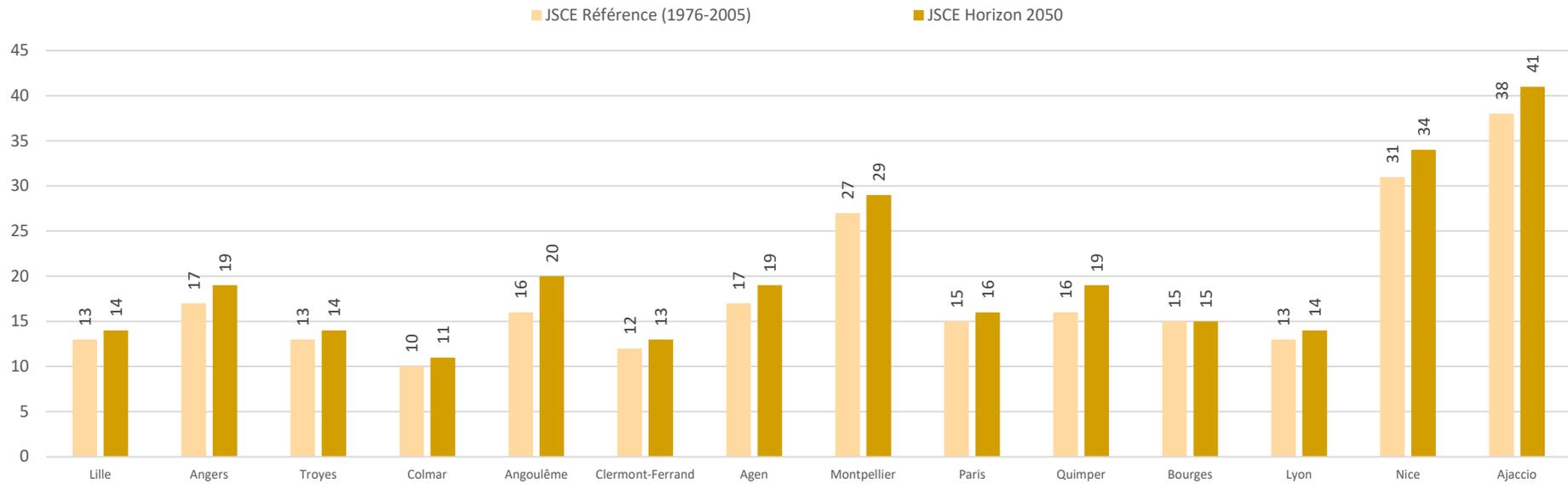
### C. Estimation du cumul de précipitations estivales (en mm)



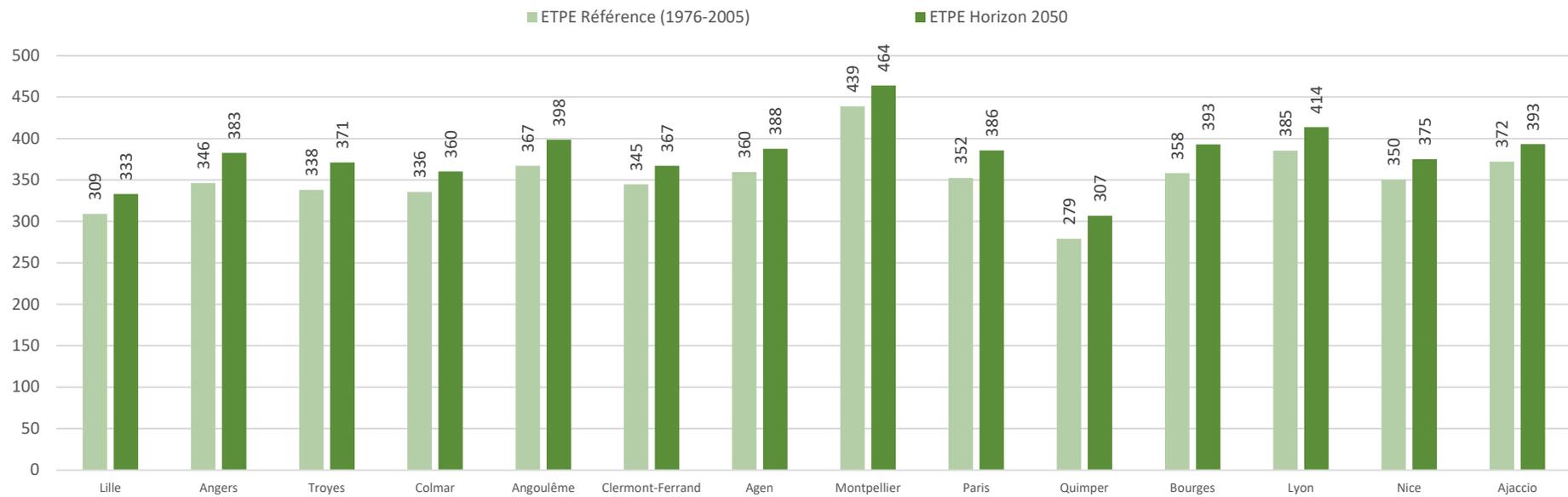
### D. Estimation du nombre de jours de gel



### E. Estimation du nombre de jours secs consécutifs en été



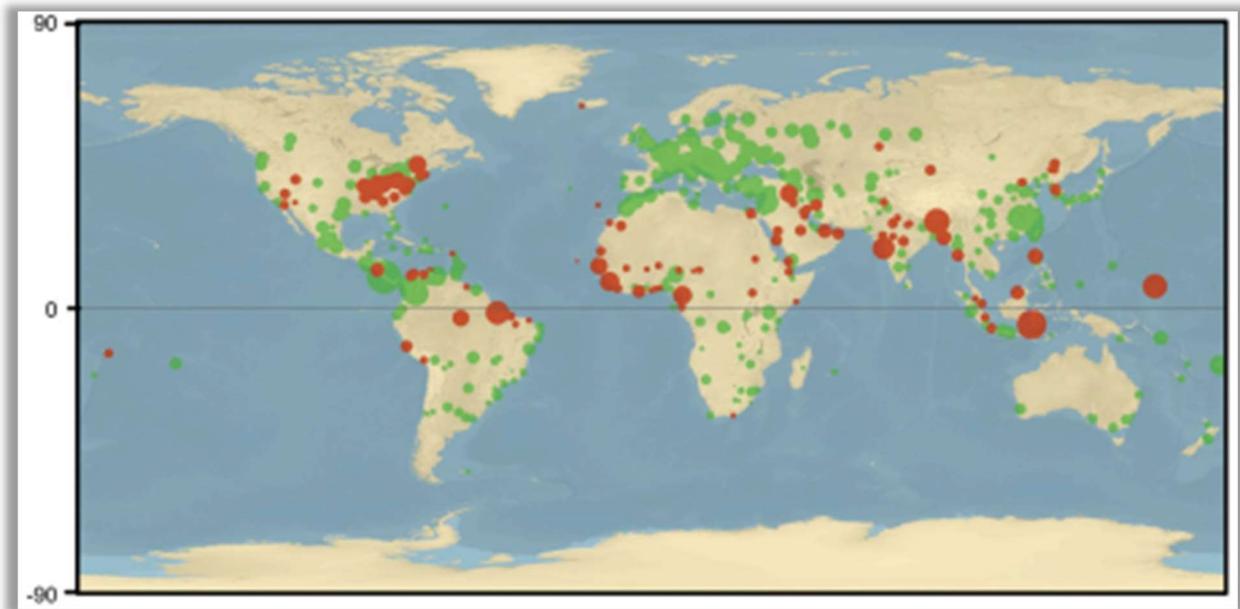
### F. Estimation de l'ETP cumulée sur la période estivale (en mm)



**Figure 9** : Estimations de différents paramètres climatiques et agroclimatiques pour 14 villes de France métropolitaine, obtenus à partir des données de la DRIAS (températures moyennes estivales (A) et hivernales (B) ; cumuls de précipitations estivales (C) et hivernales (D) ; nombre de jours secs consécutifs en été (E) ; ETP cumulée en période estivale (F) – Réalisation à partir de S2

A partir des données climatiques générées par les modèles de projections, on peut rechercher des régions, ou des villes, au climat analogue, c'est-à-dire des zones dont le climat actuel est relativement proche de celui qu'une zone donnée connaîtra à l'avenir. Cela permet de se projeter plus concrètement et de prendre conscience des évolutions à venir.

Dans la Figure 10 ci-dessous, les cercles verts correspondent aux villes pour lesquelles un analogue climatique en 2050 existe. Elles représentent environ 80% des villes analysées dans l'étude de Bastin et al<sup>[B9]</sup>. Il faut noter que pour 20% des villes de la planète, représentées par les cercles orange et principalement situées en zone équatoriale, il n'y a pas d'analogues climatiques : pour ces zones, il est impossible de s'attendre à un climat déjà connu ailleurs sur la planète <sup>[C1, B9]</sup>.



**Figure 10** : Ampleur des changements climatiques dans les principales villes du monde d'ici 2050. En vert, existence d'un analogue climatique ; en rouge, absence d'analogue climatique. La taille du point est proportionnelle à l'amplitude du changement entre le climat actuel et le climat futur – Source : B9

Globalement, le continent européen possède un analogue climatique pour 2050, à fortiori la France. Il est intéressant de noter que les territoires français ultra-marins semblent également présenter des analogues climatiques.

Le site Climate Change Explorer<sup>[S3]</sup> permet ainsi de rechercher la ville analogue à celle d'intérêt, grâce à un calcul de similarité entre les données historiques sur la période de référence 1970-2000 et les données estimées pour les périodes 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080 et 2081-2100.

Dans les figures présentées ci-dessous, on considère l'horizon 2041-2060, avec le scénario tendanciel SSP3-7.0 du GIEC (tendance actuelle, peu de choses sont faites pour limiter l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre), en prenant en compte les variables calculées suivantes : température moyenne annuelle, température maximale moyenne, température minimale moyenne, précipitations annuelles, saisonnalité des précipitations et saisonnalité des températures.

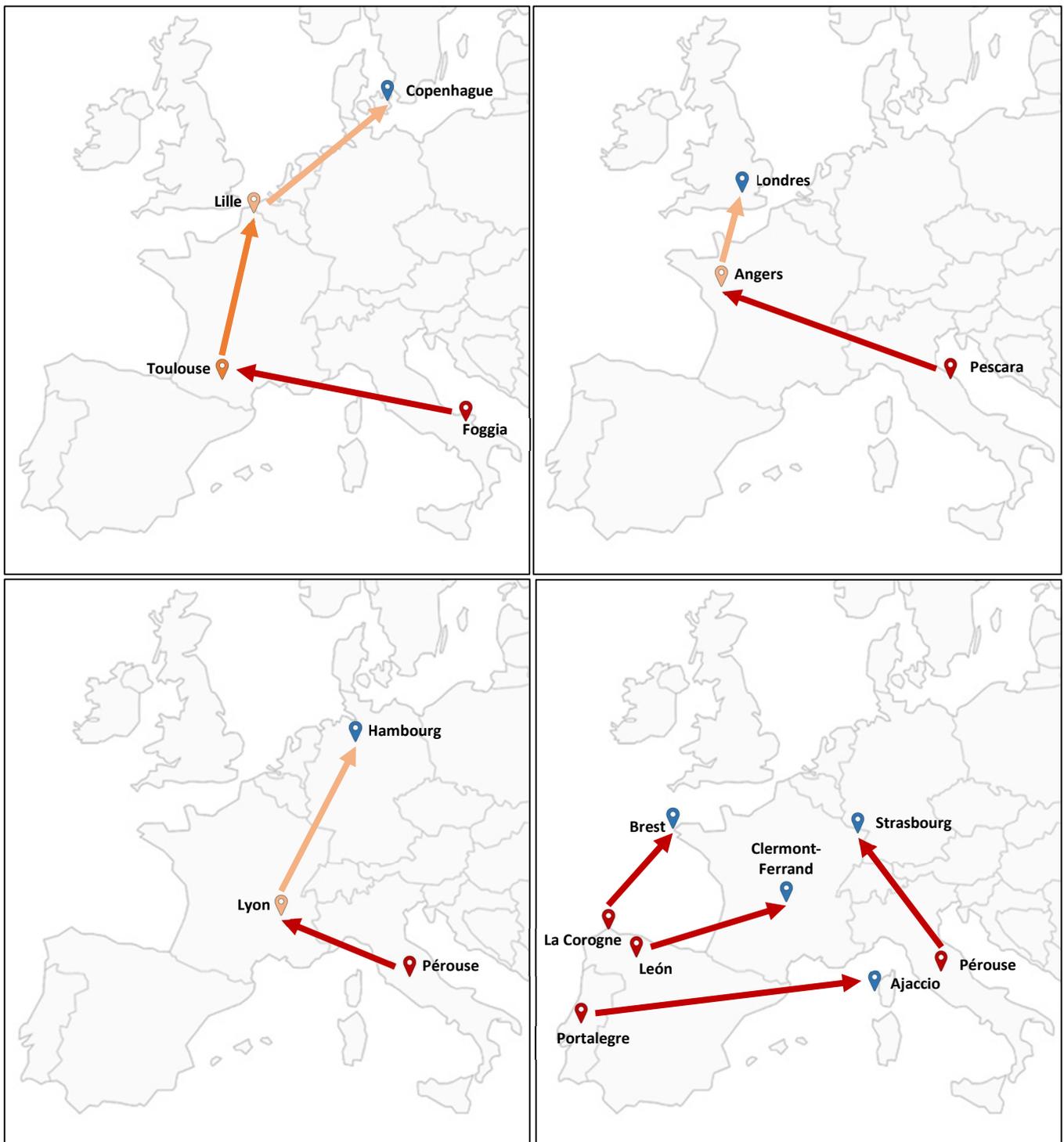
Les cartes ci-dessous (Figure 11 et Figure 12) présentent les analogues climatiques :

- De villes françaises dont on cherche à déterminer l'analogue climatique
- De villes hors de France dont l'analogue climatique en 2050 sera situé en France

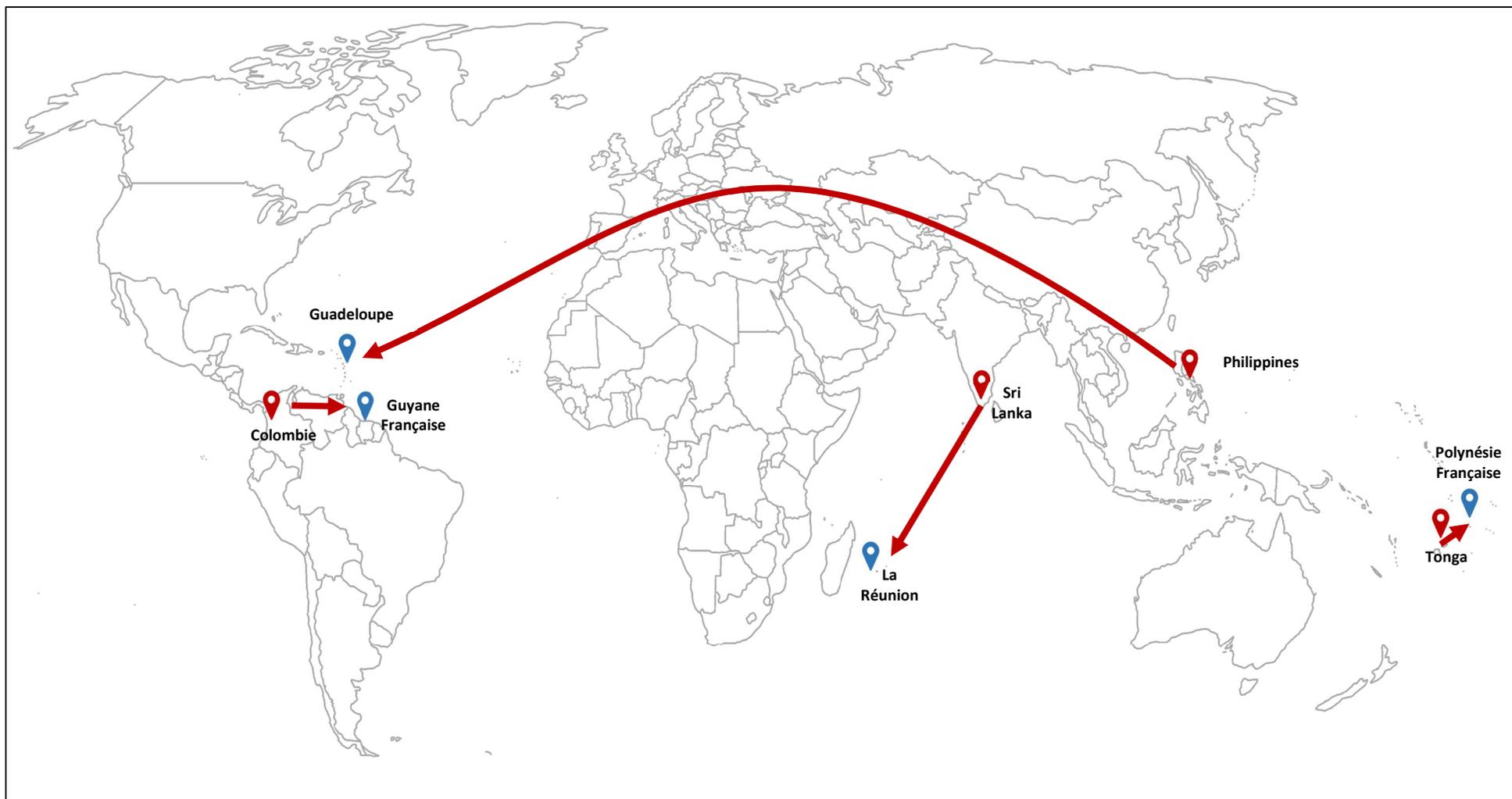
Par exemple, en 2050, Copenhague (Danemark) connaîtra un climat similaire à celui de Lille sur la période 1970-2000. Lille connaîtra elle-même le climat de Toulouse, et Toulouse présentera un climat similaire à celui de Foggia, en Italie.

Comme attendu, on constate que les zones climatiques remontent vers le Nord (pour l'hémisphère Nord), et donc que chaque zone donnée connaîtra un climat similaire à celui d'une ville localisée plus au Sud.

Le site Climate Change Explorer permet également de rechercher les analogues climatiques pour les territoires ultra-marins, qui sont présentés sur la carte mondiale ci-dessous. Cependant, ces zones ne sont pas identiques à 100% : la durée du jour et le rayonnement varient avec la latitude, le contexte pédologique, le relief ... peuvent différer et ne pas permettre une projection fiable à 100%.



**Figure 11 :** Cartes d'analogues climatiques en 2050 pour les villes françaises métropolitaines. La ville « pointée » par une flèche présentera le futur climat de la ville à l'origine de la flèche – Réalisation à partir de S3



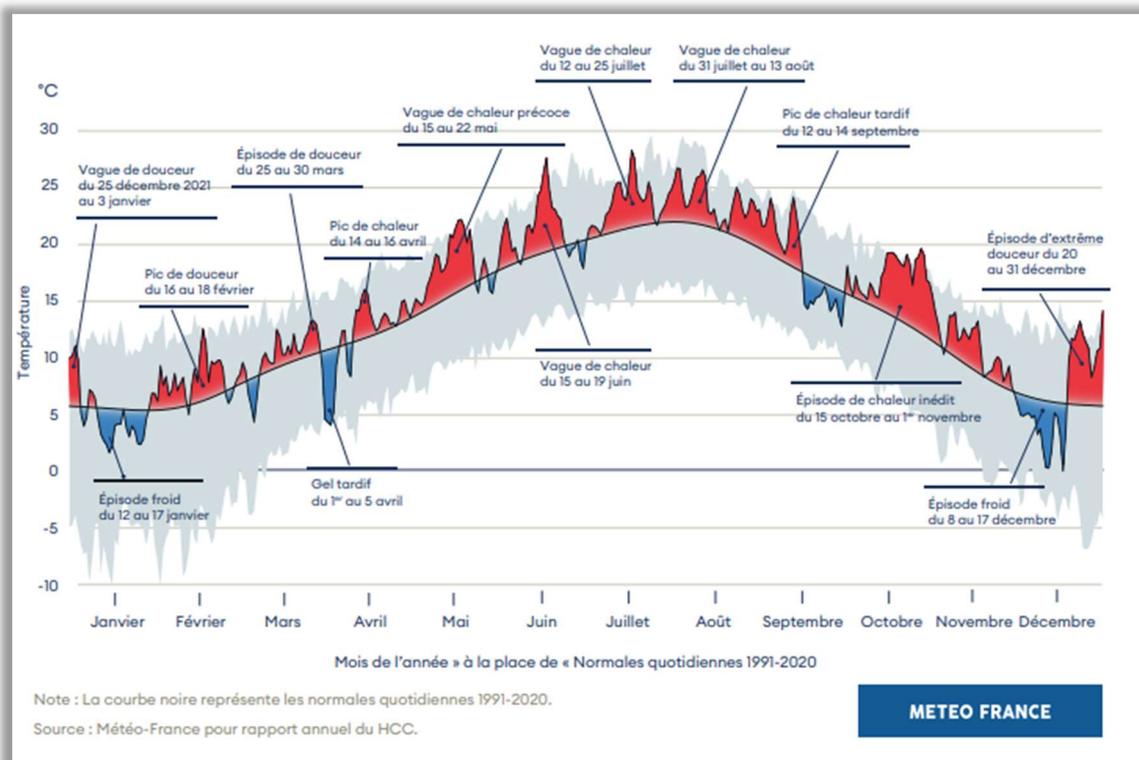
**Figure 12** : Cartes d'analogues climatiques en 2050 pour les territoires ultramarins. La zone « pointée » par une flèche présentera le futur climat de la zone à l'origine de la flèche – Réalisation à partir de S3

### 3. Années 2022 et 2024 : projections d'un futur plus que probable ?

Les années récentes nous donnent un aperçu de la variabilité interannuelle qui s'amplifie sous l'effet du changement climatique, et de l'imprédictibilité des conditions climatiques rencontrées : les années sont proches temporellement, mais présentent un profil particulièrement différent.

#### a. Description du climat de l'année 2022

L'année 2022 a été une année record en France, avec une température moyenne **de +2.9°C** par rapport à 1900-1930. Des températures supérieures aux normales quotidiennes 1991-2020 ont été observées sur la majorité de l'année<sup>[B8]</sup>. Plusieurs vagues de douceur (de janvier à mars, puis en décembre), ainsi que de chaleur (d'avril à octobre) ont notamment été observées, comme le montre le graphique ci-dessous (Figure 13).



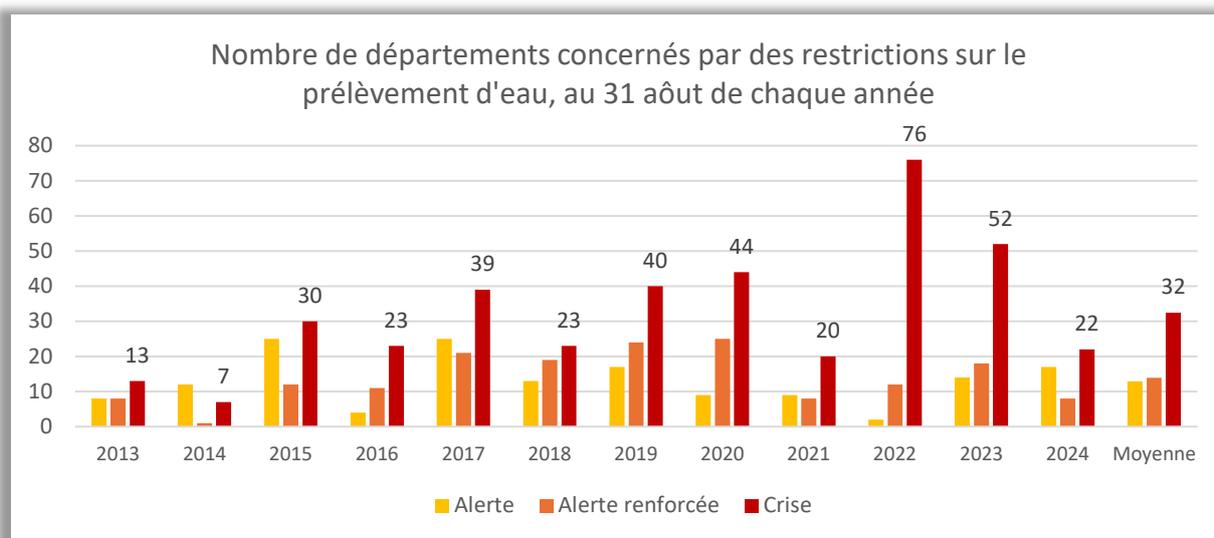
**Figure 13** : Evolution de la température moyenne quotidienne en France métropolitaine en 2022 - Source : B8

Il faut noter que, selon les méthodes de projections du climat, il y aura près de 50% à 66% de probabilité d'observer une année plus chaude que l'année 2022 en 2050 avec un réchauffement global de +2°C. Cette probabilité augmente à 75% avec un réchauffement de +4°C.

La pluviométrie de l'année 2022 est également remarquable, avec un manque de **-25% de cumul** annuel par rapport à la normale 1991-2020 sur l'ensemble du territoire national. Certaines régions sont davantage touchées (-40% en région Provence-Alpes-Côte d'Azur).

Les territoires ultra-marins ont quant à eux connu des épisodes de pluie intenses, en alternance avec des périodes de forts déficits.

La combinaison des fortes températures et des faibles précipitations a induit une sécheresse des sols superficiels importante sur la majorité du territoire. Le niveau des nappes souterraines a également été impacté. Face à la sécheresse, l'irrigation a été totalement interdite dans 76 départements au 31 août 2022, contre 20 départements à la même date en 2021 (32 départements en moyenne sur la période 2013-2024 ; voir Figure 14)<sup>[S4]</sup>.



**Figure 14** : Nombre de départements concernés par des restrictions sur le prélèvement d'eau, au 31 août de chaque année entre 2013 et 2024. Niveau « **Alerte** » : Réduction de tous les prélèvements en eau et interdiction des activités impactant les milieux aquatiques. Restrictions d'arrosage, de remplissage et de vidange des piscines, de lavage des véhicules et d'irrigation de cultures ; Niveau « **Alerte renforcée** » : Réduction de tous les prélèvements en eau et interdiction des activités impactant les milieux aquatiques. Restrictions renforcées d'arrosage, de remplissage et de vidange des piscines, de lavage des véhicules et d'irrigation de cultures ; Niveau « **Crise** » : Ce niveau est déclenché pour préserver les usages prioritaires. Interdiction des prélèvements en eau pour l'agriculture (totalement ou partiellement), pour de nombreux usages domestiques et pour les espaces publics. – Réalisation à partir de S4

De nombreux orages, souvent violents, ont été observés au mois de juin 2022.

Le rapport du GIEC indique qu'avec le changement climatique en cours, les précipitations qui accompagneront les orages violents à l'avenir seront plus intenses, avec également une possibilité que les épisodes de grêle associés aux orages augmentent en fréquence.

#### b. Impacts sur les filières agricoles en 2022

**Tableau 1** : Impacts des conditions climatiques sur les filières agricoles en 2022 - Réalisation à partir de B4, B10, B11 et S5

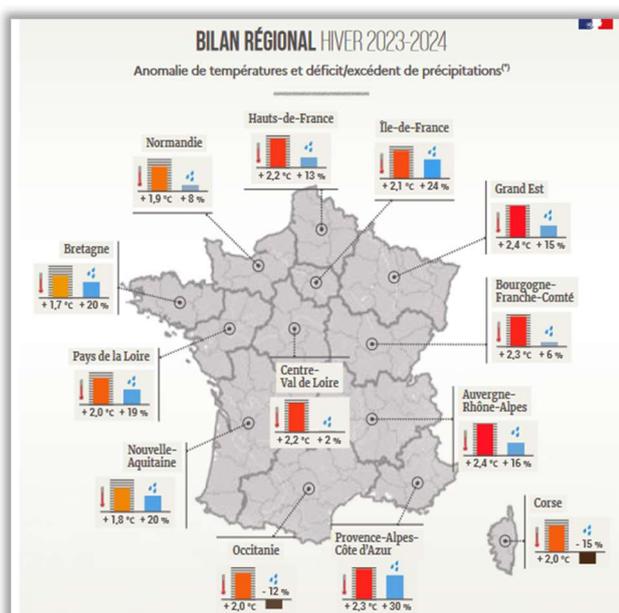
Espèces	Impact
Céréales	Récoltes fortement impactées, avec une baisse moyenne de -10.5%, notamment sur le rendement des cultures de printemps (-28.4%) <sup>[B11]</sup>
Maïs grain	Production la plus faible depuis 1990 en raison de la sécheresse, avec une baisse de rendement (-24.3%) en raison du manque de précipitations. Même sur les parcelles irriguées, le rendement chute de -8.1% par rapport à la moyenne quinquennale <sup>[B11]</sup>
Maïs fourrage	Bonne implantation des cultures de maïs fourrage précoces grâce aux températures excédentaires du printemps, mais les semis tardifs ont souffert d'un sol déjà très sec. Le mois de mai, très sec, a limité la pression des adventices. Les floraisons ont eu lieu avec 10 à 15 jours d'avance, et la sécheresse de l'été a fortement affecté le remplissage des grains, avec un rendement en baisse (jusqu'à -30% dans le Centre-Ouest et Sud-Est) <sup>[B10]</sup>
Sorgho	Forte baisse des rendements en raison de la sécheresse : -21.4% <sup>[B11]</sup>
Colza	Rendement en augmentation de +8.9% en moyenne sur un an, avec des hausses très fortes en Champagne-Ardenne (+41.4%), Nord-Pas-de-Calais (+39.4%) et Picardie (+33.5%) <sup>[B11]</sup> . Cela s'explique notamment par un excellent quotient photothermique sur la phase floraison-nouaison, pour le colza, qui fleurit plus tôt que les autres espèces et a donc pu échapper aux conditions très dures qui ont impacté les autres cultures
Tournesol	Chute du rendement moyen de près de 25%, passant de 27.4 q/ha en 2021 à 20.5 q/ha en 2022.

	Terres Inovia estime pourtant que le tournesol a mieux résisté à la chaleur et à la sécheresse que d'autres cultures. Les conditions climatiques chaudes et sèches ont induit une croissance lente, avec des impacts sur la floraison, et un remplissage des graines plus difficile <sup>[55]</sup>
Soja	Fort recul des rendements : -24.7% <sup>[B11]</sup>
Betterave sucrière	Bon développement des betteraves au printemps, remise en cause des prévisions de rendement en raison des températures et de la sécheresse en août 2022 (-7.1% par rapport à 2021, -3.7% par rapport à la moyenne quinquennale). Par ailleurs, les pluies de septembre ont limité la teneur en sucre des racines <sup>[B11]</sup>
Pomme de terre	Diminution des rendements sur les pommes de terre de conservation et de demi-saison, de -9.3% par rapport à 2021, -6.8% par rapport à la moyenne quinquennale. Les vagues de chaleur ont également entraîné des problèmes de qualité, avec des taux de matière sèche trop élevés, des problèmes de calibre et des levées de dormances dans certains cas <sup>[B11]</sup>
Fruits	Les récoltes de fruits sont meilleures qu'en 2021, qui avait connu des épisodes de gels dramatiques. On note toutefois les effets de la canicule et de la sécheresse sur la réduction des calibres, comme c'est le cas sur les pêches et nectarines. Le calendrier de campagne de production est plus resserré, par exemple pour les cerises, en raison de la précocité de la végétation <sup>[B11]</sup>
Légumes	Les récoltes de légumes frais d'été ont diminué, affectées par la sécheresse et les températures estivales (concombre, courgette, tomate, laitue). La précocité du melon lui a permis d'éviter en partie les effets négatifs de la sécheresse <sup>[B11]</sup>
Vigne	La récolte viticole s'en sort mieux (+20%) qu'en 2021, là encore en raison des épisodes de gel de l'année précédente (+20% par rapport à 2021, + 6% par rapport à la moyenne quinquennale). Les pluies de fin d'été ont permis la maturation finale du raisin et atténué les effets de la sécheresse sur les volumes. Les vendanges ont été précoces et se sont déroulées dans un excellent état sanitaire en majorité <sup>[B11]</sup>
Prairie	Le déficit de la production est très important à l'échelle nationale, avec -24%, soit le rendement le plus faible depuis 2003. Cela est dû aux fortes chaleurs et à la sécheresse estivales <sup>[B4]</sup>

### c. Situation de la saison 2023 – 2024

L'automne 2023 a été le plus chaud jamais mesuré en France, et l'hiver 2023-2024 termine au 3<sup>e</sup> rang des hivers les plus chauds, avec une température moyenne supérieure d'environ 2 °C à la moyenne de référence 1991-2020 (voir la [Figure 15](#)). Le mois de février a même présenté une anomalie de +3.6°C à l'échelle du mois. En moyenne, l'excédent pluviométrique atteint quant à lui +10% cet hiver (à l'exception de la Corse et du Languedoc-Roussillon). L'hiver 2023-2024 est également marqué par un manque de soleil sur une grande partie du pays. Le déficit d'ensoleillement a atteint 10 à 30 % du Centre-Ouest au Bassin parisien et aux Ardennes<sup>[B12]</sup>.

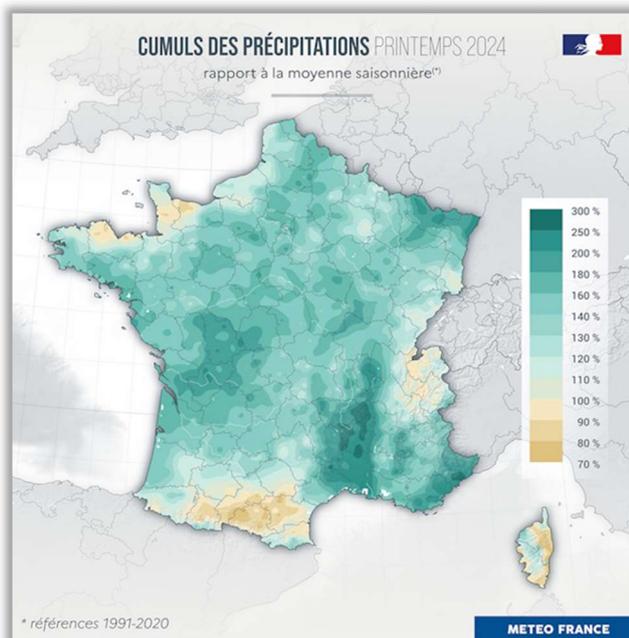
Par la suite, le printemps 2024 a été le 4<sup>ème</sup> printemps le plus arrosé jamais enregistré (+45% de précipitations par rapport à la période 1991-2020, voir [Figure 16](#)), accompagné d'un déficit d'ensoleillement de près de 20%. Les nombreux épisodes pluvieux ont entraîné par endroits des inondations



**Figure 15** : Bilan régional de l'hiver 2023/2024, avec les anomalies de températures et les déficits / excédents de précipitations par rapport à la période de référence 1991-2020 - Source : B12

importantes ou encore des coulées de boue. Les températures demeurent supérieures aux normales de saison, avec +0.8°C<sup>[56]</sup>.

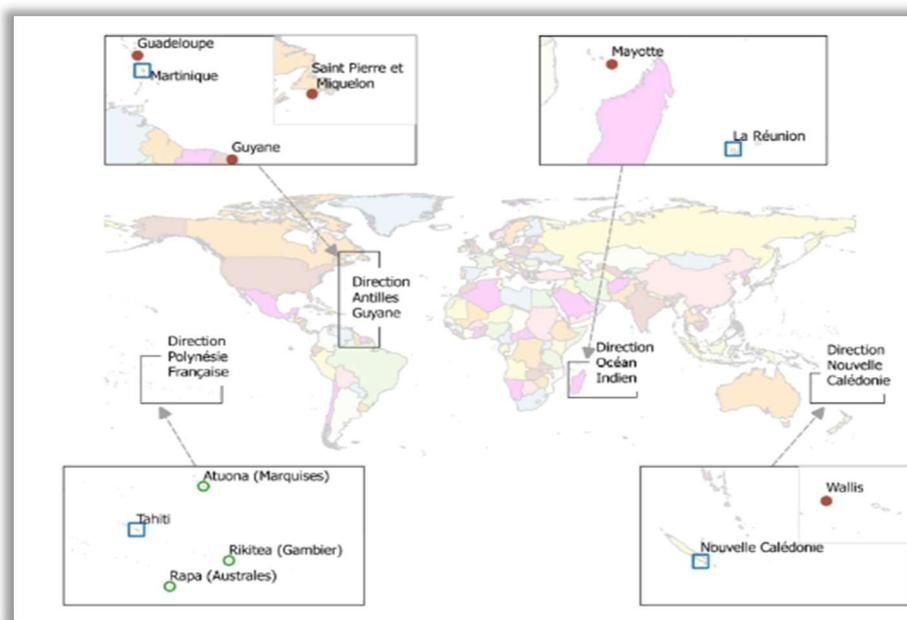
Les conditions météorologiques de la saison 2023/2024 ont posé de nombreuses difficultés, qu'il s'agisse des impossibilités de semis, des conditions de levée pour les parcelles inondées, du déficit d'ensoleillement à la floraison... Seules 62% des surfaces de blé tendre étaient dans un état « bon à très bon », contre 87% l'an dernier (en région Nouvelle-Aquitaine, ce chiffre tombe à 41%)<sup>[57]</sup>. Ces conditions ont conduit à un recul de 11% des surfaces emblavées, et on estime la baisse du rendement à près de 5% en blé tendre<sup>[58]</sup>.



**Figure 16** : Cumuls des précipitations au cours du printemps 2024, par rapport à la période de référence 1991-2020 – Source : S6

#### 4. Focus sur les territoires ultramarins

Au cours du séminaire « Agricultures ultramarines et changement climatique »<sup>[B6]</sup>, qui s'est tenu en octobre 2023, Emmanuel Cloppet, Directeur régional Antilles-Guyane pour Météo France, a dressé un état des lieux des changements climatiques déjà en cours et des prévisions attendues dans les territoires ultra-marins, en rappelant que l'Outre-mer est « probablement en première ligne par rapport au changement climatique ». En effet, à l'exception de la Guyane, il s'agit de territoires insulaires, dont les positions géographiques se situent principalement en atmosphère tropicale ou



**Figure 17** : Carte des territoires d'outre-mer – Source : B6

équatoriale, dont les topographies renforcent les effets du changement climatique et qui sont ainsi exposés à des phénomènes météorologiques plus violents que ce que l'on peut connaître aux moyennes latitudes (voir [Figure 17](#)).

Afin d'affiner les prévisions du changement climatique sur ces territoires, un travail de régionalisation est en cours à travers des projets et des initiatives régionales spécifiques. L'Océan Indien est la zone la plus en avance avec le projet BRIO qui vient de se terminer et qui permet d'avoir des données à maille de trois kilomètres pour l'île de la Réunion. D'autres initiatives débutent sur la zone Pacifique avec le projet CLIPSSA, et un certain nombre d'études ont également été lancées sur les Antilles et la Guyane, avec les projets C3AF, Explorer et GuyaClimat pour la Guyane.

Le changement climatique Outre-mer est déjà une réalité, avec en particulier un réchauffement de l'ordre de 0,25 degré par décennie sur les 50 dernières années : cela revient à dire qu'en moyenne, dans les territoires d'Outre-mer, le climat s'est déjà réchauffé de 1 à 1,5 degré sur les 50 dernières années. Cela est cohérent avec l'augmentation de la température mondiale, même s'il existe des disparités, avec une augmentation un peu moindre à la Réunion et un peu plus rapide sur les Antilles ou la Polynésie.

La pluviométrie est également en train d'évoluer : à Mayotte par exemple, on constate sur les 30 dernières années une baisse significative des précipitations en saison sèche.

A la Réunion, des premiers signes d'une baisse des précipitations sur le sud-ouest de l'île sont visibles, avec un tiers de précipitations en moins sur les 60 dernières années sur certaines régions de l'île.

On observe également une élévation du niveau de la mer, de l'ordre de 3,7 millimètres par an sur les 30 dernières années, avec des vraies disparités d'une région à l'autre. Par exemple, dans l'Océan Indien, c'est 5 millimètres en plus par an qui sont observés par les satellites altimétriques en matière d'élévation du niveau de la mer. C'est le cas de Mayotte, qui s'est dans le même temps enfoncé de 18 centimètres, en lien avec la présence d'un volcan sous-marin au large de l'île.

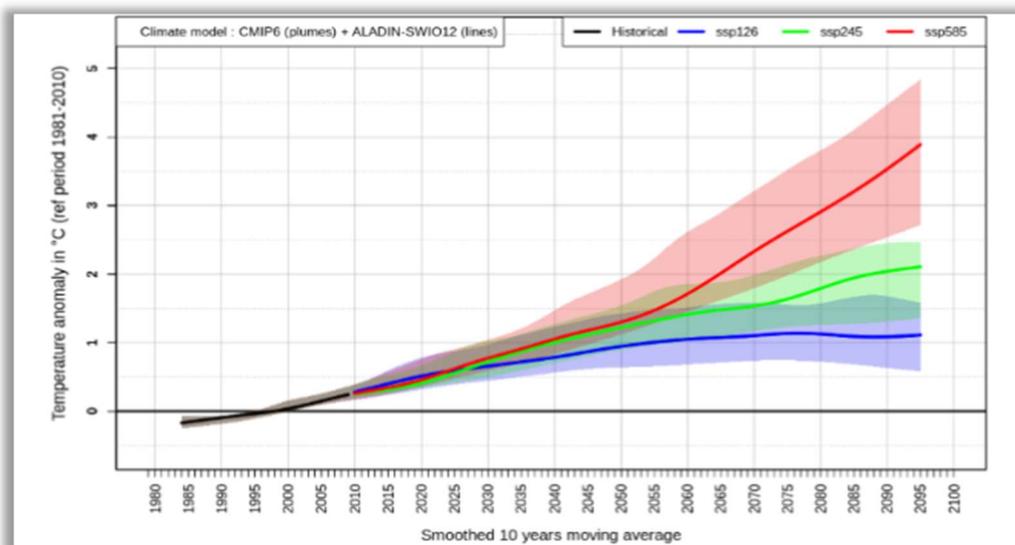
L'exposition des territoires ultra-marins au phénomène cyclonique va augmenter dans le futur, non pas en raison d'un nombre de phénomènes plus fréquents, mais de phénomènes qui vont être plus violents, plus intenses en ce qui concerne la force des vents. C'est une conséquence de l'élévation de la température de la mer : les eaux chaudes sont le carburant des cyclones. Plus les eaux seront chaudes, plus ils auront le potentiel de s'intensifier et de générer des vents forts. De plus, ces cyclones vont générer de plus en plus de pluie. C'est une conséquence de l'augmentation de la température de l'air, car plus l'air est chaud, plus il peut contenir d'eau. Une augmentation de 3 degrés, c'est 20 % de contenu en eau en plus et donc potentiellement 20 % de pluie en plus lors d'un épisode cyclonique.

Dans l'Océan Indien (la Réunion et Mayotte), les hausses de températures attendues en 2100 pourraient être spectaculaires, comprises entre 2,6 et 3,8°C dans le scénario SSP5-8.5, par rapport à l'an 2000 : cela correspond quasiment à la différence entre la saison fraîche et la saison chaude sur ces territoires. D'ici 2050, les scénarios divergent peu, et il faut s'attendre à une augmentation de l'ordre de 1 à 1.3°C par rapport à l'an 2000 (voir [Figure 18](#)).

Le nombre de jours avec une forte chaleur (> 31°C) pourrait également connaître une hausse importante, atteignant plus de 200 jours par an (soit une multiplication par 14), en cas de scénario défavorable, à la fin du siècle.

Cela s'accompagne également d'une tendance à l'assèchement, principalement sur la saison sèche, avec des baisses de précipitations sur l'Océan Indien comprises entre 10 et 35 % (scénario SSP1-2.6 et SSP5-8.5, respectivement) et un retard au démarrage de la saison cyclonique, c'est-à-dire que la saison des pluies démarrerait plus tard et la saison sèche serait donc plus intense.

En Nouvelle-Calédonie comme en Polynésie française, les tendances moyennes sont de l'ordre de + 3 degrés sur la fin du siècle, avec une augmentation du contraste entre les saisons humides et les saisons sèches.



**Figure 18** : Prévisions de l'évolution des anomalies de températures à l'horizon 2100 à Mayotte selon les différents scénarios établis par le GIEC – Source : B6

Les Antilles devraient également connaître un fort réchauffement, de l'ordre de 3 degrés aussi d'ici la fin du siècle, des vagues de chaleur plus fréquentes, des épisodes secs également plus fréquents et un assèchement important projeté sur certaines périodes de l'année.

En Guyane, il faut s'attendre à un réchauffement supérieur, qui pourrait aller jusqu'à 4 ou 4,5 degrés, car les territoires continentaux se réchauffent plus que les territoires insulaires, qui sont un peu tamponnés par la température de la mer et se réchauffent moins vite.

Enfin, les tendances globales sont les mêmes pour les îles du Nord de la zone, Saint-Martin et Saint-Barthélemy, que pour les Antilles françaises : un climat plus chaud et plus sec.

### Impacts des conditions climatiques sur les cultures ultramarines

La capacité de production agricole et alimentaire des territoires ultramarins est conditionnée par plusieurs facteurs spécifiques, tels que les contraintes liées à l'insularité, et au relief souvent accidenté de ces territoires et la part importante des cultures d'exportation (par exemple, canne à sucre, banane, noix de coco).

Le changement climatique est d'ores et déjà perceptible dans ces territoires. Ainsi, les sécheresses et les températures plus élevées impactent les cultures : à la Réunion, en 2023, la production de letchis a été très mauvaise (2 800 tonnes contre 7 000 tonnes pour une bonne année) <sup>[S9]</sup> en raison de la sécheresse, mais aussi d'un hiver trop doux qui n'a pas permis l'enclenchement de la floraison des arbres <sup>[S10]</sup>. Le changement climatique s'exprime aussi de façon singulière dans ces territoires, notamment à travers les cyclones dont l'intensité est en augmentation aux Antilles françaises. Ces cyclones peuvent dévaster les cultures : par exemple, les cyclones Matthew (2016) et Maria (2017) ont arraché une grande partie des bananeraies en Guadeloupe et en Martinique, entraînant une baisse de production de près de 80% en 2017 (1000 tonnes produites par semaine contre 5000 tonnes habituellement) <sup>[S11]</sup>. La plupart des zones dévastées doivent être mises en jachère pour une durée de 12 à 18 mois, ce qui impacte durablement la capacité de production <sup>[S12]</sup>. Enfin, un décalage dans la saison des pluies et une pluviosité excessive sont à l'origine de « la plus mauvaise campagne sucrière jamais enregistrée » en Guadeloupe en 2024 : les opérations de coupe sont compliquées, l'accès à certaines parcelles impossibles en raison des conditions climatiques, et cela s'accompagne d'une baisse du rendement sucrier de 41% par rapport aux dix dernières années, en raison d'un effondrement de la richesse en saccharose des cannes et de la pureté des sucres <sup>[S13]</sup>.

### C. Les effets du changement climatique sur la réponse physiologique des plantes cultivées

Les effets du changement climatique sont de deux natures distinctes :

- D'une part le changement des moyennes météorologiques (températures moyennes et pluviométrie moyenne), qui sont des éléments relativement prévisibles
- D'autre part, la variabilité importante et imprédictible des conditions de culture, qui peut parfois mener à la survenue d'évènements climatiques extrêmes et imprévisibles (températures anormalement élevées et vagues de chaleur, gel, grêle, manque d'eau et sécheresse, pluies importantes et inondation).

#### 1. Les effets de l'augmentation de la concentration en CO<sub>2</sub>

L'augmentation de la concentration en CO<sub>2</sub> atmosphérique permet généralement d'avoir des effets positifs sur l'accumulation de biomasse<sup>[B13]</sup> grâce à un taux plus élevé de photosynthèse (+20 à 45% pour les plantes en C3, en saturant la RUBISCO et en diminuant la photorespiration) et une meilleure utilisation de l'eau, ce qui permet un accroissement de la tolérance des cultures à des conditions plus sèches. Dans le même temps, cela augmente la sensibilité au stress thermique car les plantes ont moins de possibilité de réguler la température via l'évapotranspiration<sup>[B4]</sup>.

Cependant, les effets bénéfiques du CO<sub>2</sub> ne permettent pas systématiquement de compenser les effets négatifs de températures plus élevées et d'humidité relative plus basse en raison de l'évaporation augmentée. De plus, des concentrations élevées en CO<sub>2</sub> peuvent affecter la qualité de la production, par exemple en réduisant le contenu protéique des grains des plantes céréalières en C3<sup>[B4, B13]</sup>.

#### 2. Les effets du changement des températures moyennes

L'augmentation des températures moyennes va entraîner un décalage dans la phénologie des cultures : on constate par exemple une avance généralisée des phases de développement des céréales à l'échelle européenne<sup>[B4]</sup>, ou encore une avancée dans la date de vendange des vignobles de 20 jours en moyenne depuis la fin des années 1980<sup>[B5]</sup>. Le décalage des cycles phénologiques risque également d'entraîner une désynchronisation entre la production de pollen et la présence des pollinisateurs.

Cette augmentation entraînera également un développement plus rapide des végétaux, ce qui va induire des dates de floraison et de maturité plus précoces d'une à trois semaines d'ici 2050. Le raccourcissement des cycles de culture risque de diminuer les rendements, avec une durée réduite pour le remplissage des grains et donc des rendements inférieurs par manque de temps pour l'accumulation de biomasse, notamment pour les céréales et les cultures de légumineuses et d'oléagineuses<sup>[B4]</sup>. On estime que le rendement de certaines cultures (soja, maïs, blé, riz) pourrait diminuer de 3 à 12% à chaque augmentation de 1°C<sup>[B13]</sup>.

De plus, les températures nocturnes élevées, associées à une évaporation plus importante, risquent d'impacter négativement les rendements et la qualité finale des produits récoltés<sup>[B14]</sup>.

L'augmentation des températures moyennes va également induire un réchauffement marqué des hivers, et des printemps plus doux, ce qui pourrait entraîner des débourrements précoces, notamment pour les fruitiers et la vigne, augmentant le risque d'exposition au gel. Un accroissement du risque gélif est également probable pour les cultures annuelles d'hiver, notamment en raison d'une moins bonne acclimatation liée aux températures diurnes hivernales plus élevées<sup>[B15]</sup>. Il faut également s'attendre à une potentielle extension de la saison de culture, notamment pour les plantes pérennes.

Les plantes pérennes, notamment les oliviers et la vigne, qui sont des cultures que l'on rencontre dans des niches climatiques spécifiques, sont particulièrement à risque face à l'augmentation des températures moyennes.

Cependant, dans certaines zones, les conditions plus chaudes pourraient offrir des opportunités pour la culture de nouvelles espèces / variétés, entraînant des évolutions de filière qu'il va falloir anticiper au niveau des consommateurs et de la transformation.

L'augmentation des températures devrait également permettre d'optimiser les conditions de production de certaines cultures : valorisation de l'augmentation du rayonnement et de la concentration de CO<sub>2</sub> pour le blé, le tournesol et le colza, semis plus précoce en maïs grain, augmentation du nombre de jours disponibles pour les ensemencements de blé<sup>[B5]</sup>.

L'augmentation des températures pourrait également donner l'opportunité de réaliser 2 cycles de cultures par an, ou au moins 3 cycles sur 2 ans, ainsi que de mettre en place des cultures complémentaires ou des couverts végétaux (qui participent à limiter la lixiviation des nitrates et les pertes par évaporation)<sup>[C1, B4]</sup>. Cette opportunité doit néanmoins être nuancée, car la question de la disponibilité en eau pour mener 2 cycles de cultures consécutifs demeure une interrogation importante<sup>[B16]</sup>.

Le réchauffement climatique va également entraîner une migration des pathogènes et des ravageurs vers les zones plus au Nord qu'actuellement. Cela va également favoriser la survie des pathogènes et des ravageurs dont les cycles de survie et de reproduction sont fortement impactés par les températures basses<sup>[B4, B13]</sup>. Les infestations pourraient être plus précoces qu'actuellement, car certains ravageurs auront une meilleure survie hivernale. Néanmoins, dans les régions les plus au Sud, le nombre de générations de ravageurs au cours de la saison, tout comme la survie estivale d'inoculum pendant les périodes d'interculture, pourrait décroître, en raison notamment d'une humidité insuffisante, comme cela a été montré sur blé<sup>[B17]</sup>.

Le risque de contamination pendant le stockage va également progresser, avec par exemple le risque accru de contamination aux aflatoxines sur maïs et blé, qui pourraient rendre les récoltes impropres à la consommation<sup>[B4]</sup>.

### 3. Evolutions tendancielles et variabilité climatique

Des températures élevées sur une durée prolongée forment une vague de chaleur. Leur fréquence d'occurrence a augmenté depuis les années 1950, et les projections prévoient leur multiplication dans la zone méditerranéenne d'ici 2100<sup>[B4]</sup>.

Les effets d'un stress thermique chaud sont multiples : dénaturation de protéines, impact sur les enzymes photosynthétiques, dégradation de la chlorophylle, changement dans la fluidité et la perméabilité membranaire, mort cellulaire...<sup>[B13]</sup>, ce qui se traduit à l'échelle de la plante par une réduction de la photosynthèse, une diminution de l'efficacité de la transpiration, des impacts sur le développement racinaire ...<sup>[B4]</sup> Des épisodes de courtes durées peuvent suffire à impacter les cultures en phase sensible, telle que le stade reproductif (floraison, viabilité du pollen, fécondation...) ou le remplissage des grains, tandis que des stress prolongés peuvent entraîner la perte totale de la culture<sup>[B4, B13]</sup>.

Les effets principaux des stress thermiques sur le rendement du blé sont liés à une réduction du nombre de grains (stérilité et avortement des grains) et une réduction de la taille des grains (dégâts cellulaires).

La probabilité de vagues de chaleur dans la zone méditerranéenne durant la période estivale pourrait entraîner des modifications dans les calendriers culturaux, allant jusqu'à inverser les saisons de culture entre l'été et l'hiver<sup>[B4]</sup>.

Les projections concernant les épisodes de sécheresse d'ici 2100 montrent une augmentation marquée de ce phénomène dans la zone méditerranéenne, ainsi que dans l'Ouest et au Sud de l'Europe, surtout au printemps et en été. L'augmentation du nombre d'épisodes de sécheresse va entraîner une augmentation de la demande en eau en Europe, notamment dans la zone méditerranéenne. Les projections de la demande en eau en Europe, via l'irrigation, montrent des besoins accrus dans le sud de l'Europe.

Cependant, certaines études montrent une diminution des besoins en irrigation dans les zones pour lesquelles les cycles de cultures vont être raccourcis, comme le blé dans le sud de l'Italie ou le maïs au Portugal<sup>[B4]</sup>.

D'ici 2050, la demande en eau devrait être supérieure à la disponibilité en eau, à moins que des alternatives dans la gestion de l'eau et des changements de consommation alimentaire ne soient mis en place.

Lors des épisodes de sécheresse, le potentiel hydrique du sol diminue, ce qui entraîne une diminution du potentiel hydrique dans les racines et les feuilles des plantes, et donc une déshydratation des tissus. Cela entraîne une baisse de la pression de turgescence dans les feuilles, d'où une diminution de la surface foliaire et de la biomasse de surface<sup>[B13]</sup>.

Au contraire, de nombreux champignons et bactéries pathogènes ont besoin d'un taux d'humidité élevé, dans le sol ou sur les feuilles, pour survivre sur les plantes et les infecter. Ainsi, la sécheresse impacte les pseudo-champignons racinaires pathogènes, comme les *Pythium sp.* ou les *Plasmopara sp.* De plus, la sécheresse peut impacter la propagation de certains champignons qui ont besoin de la pluie pour disséminer leurs spores. Par conséquent, la sécheresse peut affecter négativement la survie et le développement de nombreux pathogènes foliaires et racinaires qui requièrent un certain niveau d'hygrométrie, même sans contact direct avec la plante hôte<sup>[B13]</sup>.

Les fortes précipitations vont devenir des événements climatiques de plus en plus fréquents en Europe, et avec elles le risque d'inondations et le manque de luminosité.

L'excès de précipitations peut entraîner une anoxie racinaire, accroître le risque d'infestations par des ravageurs ou des maladies, et retarder les opérations au champ, notamment les semis ou les récoltes. Ces problématiques sont particulièrement présentes dans la zone boréale, la zone Atlantique, la région Alpine et les reliefs dans la zone méditerranéenne, notamment pour les cultures de blé d'hiver et d'orge de printemps<sup>[B4]</sup>. Les effets d'excès d'eau hivernaux et estivaux sur les rendements du blé (tendre et dur) expliquent chacun en moyenne 15% des variations des rendements annuels de ces cultures<sup>[B18]</sup>. La sensibilité de la culture à un excès d'eau est très dépendante de son stade. En céréales par exemple, la semence, avant germination, est très tolérante, mais sa sensibilité entre le stade germination et le stade 1 feuille est très élevée<sup>[S14]</sup>. En 2016, en France, l'excès de pluie et le manque de luminosité en mai et juin ont fortement pénalisé les rendements des cultures d'hiver et de printemps<sup>[S15]</sup>. En colza, le déficit de luminosité a fortement impacté le remplissage des siliques en colza<sup>[B19]</sup>.

Les effets du gel (phénomène au cours duquel une fine couche de glace se forme à la surface d'un solide) sont également importants sur les cultures. La période de sensibilité est principalement comprise entre le début de la floraison et le stade de fructification. Les arbres fruitiers sont particulièrement sensibles au gel (jusqu'à 50% des dégâts imputés au gel concernent les fruitiers), tout comme la vigne. Le phénomène de « gel tardif », qui se produit alors que la plante est en phase de bourgeonnement, est particulièrement problématique, d'autant que les cultures démarrent plus précocement dans le contexte d'augmentation des températures<sup>[B4]</sup>.

Les régions méditerranéenne et alpine sont les zones les plus exposées au risque de grêle. La prédiction du risque d'augmentation de ces épisodes est relativement délicate, il y a donc peu de projection disponible.

#### 4. Combinaisons de stress abiotiques et biotiques

La probabilité de combinaisons de stress biotiques et abiotiques (combinaison de stress multifactoriels ou CSM) augmente avec le changement climatique<sup>[B20]</sup>.

Certaines réponses sont communes aux stress biotiques et abiotiques : modulation de l'ouverture des stomates, changement du statut Redox et des flux d'ions associés à la production de ROS (Reactive Oxygen Species), activation de phytohormones, modulation de familles de facteurs de transcription spécifiques, expressions de petits ARNs ... Cela signifie qu'il y a des interférences et des convergences dans les mécanismes de défense des plantes face aux stress environnementaux<sup>[B13]</sup>.

De plus, ces CSM peuvent mener à des altérations dans les voies de signalisation des défenses, prédisposant ainsi les plantes à une sensibilité accrue aux pathogènes endémiques ou nouveaux<sup>[B13]</sup>.

Des études ont montré que plus le nombre de facteurs constituant une CSM augmente, plus la diversité du microbiome du sol diminue. De plus, si chaque stress individuel peut présenter un impact négligeable sur la plante, l'impact d'une CSM peut s'avérer très préjudiciable pour la culture, en impactant négativement la santé et la performance des plantes<sup>[B20]</sup>.

Par ailleurs, la réponse d'une plante à une CSM est spécifique : il ne s'agit pas du cumul des réponses à chaque stress individuel. Cela se voit au niveau des transcrits, des protéines, des métabolites mais aussi au niveau hormonal. Par exemple, le nombre de gènes différentiellement exprimés dans le cas d'un stress combiné est très significativement supérieur à celui exprimé par chacun des stress individuellement<sup>[B13, B20]</sup>. Lorsque le nombre de stress composant la CSM augmente, ce phénomène est amplifié (davantage d'éléments de réponses uniques).

Il faut aussi noter qu'une CSM peut avoir des réponses contradictoires, qui reflètent l'opposition des différentes stratégies de chaque stress individuel. Cela se constate par exemple sur les stomates :

- En cas de sécheresse : fermeture stomatique pour éviter les pertes d'eau
- En cas de hautes températures : ouverture stomatique pour refroidir par transpiration
- En cas de forte luminosité : fermeture stomatique
- En cas de combinaison « sécheresse » + « hautes températures » : fermeture des stomates
- En cas de combinaison « hautes températures » + « forte luminosité » : ouverture des stomates

Par ailleurs, la complexité de la réponse à une CSM est similaire lorsque des stress différents ont lieu les uns à la suite des autres<sup>[B20]</sup>.

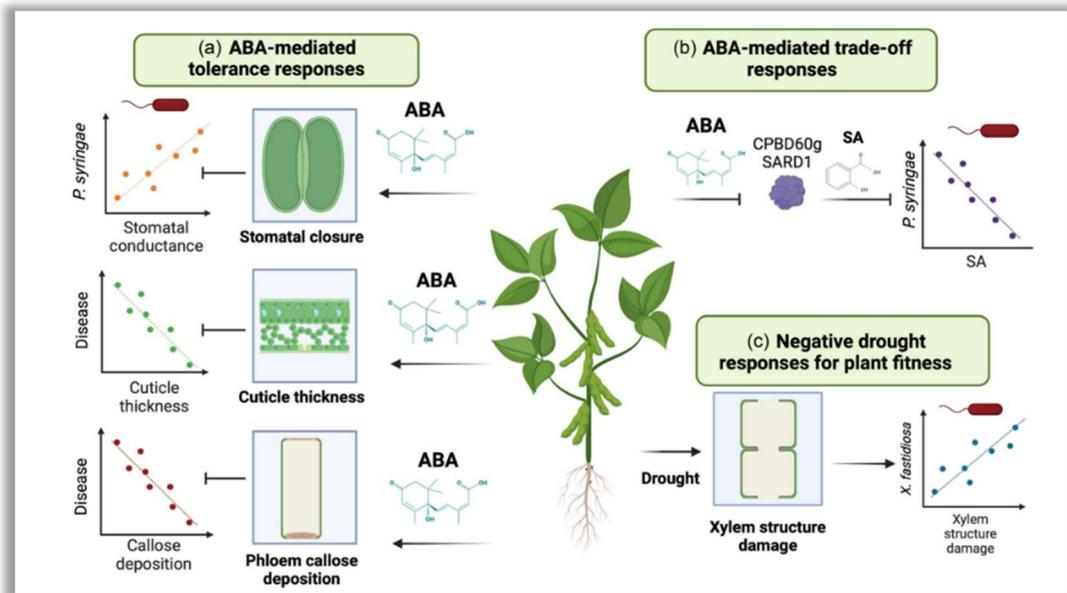
Il a également été remarqué que des CSM impactant différentes parties de la plante induisent une réponse systémique et que la transmission est ainsi plus efficace et la réponse plus rapide que si la CSM ne concerne qu'un seul organe<sup>[B20]</sup>.

La complexité des interactions fait que la résultante du changement climatique sur un couple bioagresseur-culture donné est spécifique à chaque cas, et peut difficilement être anticipée à partir de principes généraux : il doit être étudié au cas par cas, et impose donc une vigilance et l'accumulation d'observations.

#### a. Combinaison du stress hydrique et des stress biotiques

Une composante de dialogue entre les réponses des plantes à la sécheresse et au stress biotique est la phytohormone ABA (acide abscissique) : lors d'un épisode de sécheresse, il y a augmentation de la concentration en ROS, qui induit la synthèse de l'ABA pour augmenter la résistance des plantes à la sécheresse (voir [Figure 19](#)). L'ABA va alors<sup>[B20]</sup> :

- Entraîner la fermeture des stomates pour maintenir la turgescence foliaire et le potentiel hydrique de la plante. Cela entraîne une diminution de l'incidence des pathogènes qui entrent par les stomates (ex : *Pseudomonas syringae*)
- Entraîner une augmentation de l'épaisseur de la cuticule pour limiter les pertes en eau. Cela diminue l'entrée de pathogène par l'épiderme.
- Stimuler le dépôt de callose dans le phloème. Cela diminue la dispersion de pathogènes vasculaires (ex : *Pythium irrefulare*).



**Figure 19** : Différents types d'interactions entre les stress hydriques et biotiques avec l'acide abscissique (ABA) sur la plante – Source : B20

Il faut cependant noter que l'ABA va inhiber les facteurs de transcription CPB60g et SARD1 qui sont nécessaires à la production d'AS (Acide Salicylique), phytohormone jouant un rôle dans la défense aux stress biotiques, ce qui augmente la sensibilité de la plante à certains pathogènes.

L'accumulation de ROS est également à l'origine d'un stress oxydatif, entraînant des dégâts membranaires et cellulaires. Cela peut alors mener au relargage de solutés à travers les membranes, les rendant ainsi plus vulnérables aux entrées de pathogènes.

Par ailleurs, la sécheresse peut endommager la structure du xylème racinaire, ce qui réduit la conductivité du xylème et la transpiration, tout en augmentant la sensibilité à certaines maladies, comme la maladie de Pierce induite par la bactérie *Xylella fastidiosa*.

Enfin, indépendamment de la réponse des plantes, la sécheresse peut augmenter la sévérité de certaines maladies racinaires (charbon chez les céréales, pourriture charbonneuse des tiges du sorgho...), probablement via une meilleure diffusion de molécules émises par les racines et attractives des champignons en sol sec<sup>[B13]</sup>.

#### b. Combinaison du stress « thermique » et des stress biotiques

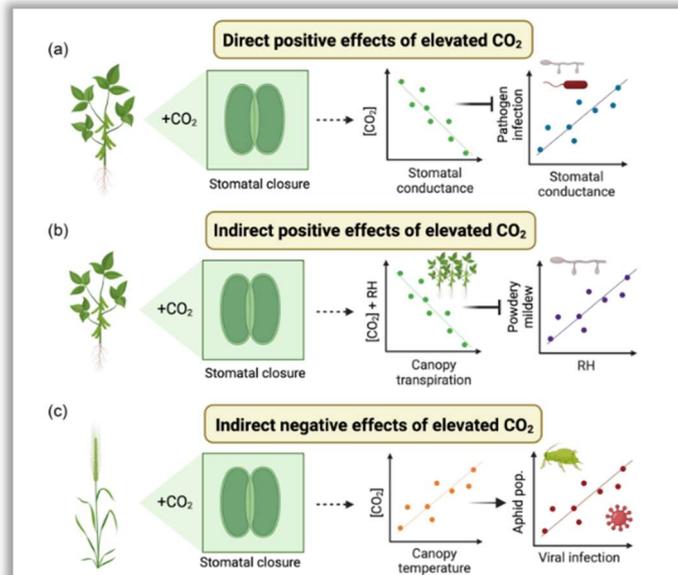
Des températures élevées, couplées à une humidité relative élevée, peuvent faciliter le développement de maladies en permettant la croissance des pathogènes, en augmentant leur virulence et en diminuant les réponses de résistance de la culture. De plus, une infection par des agents pathogènes peut compromettre la tolérance de la plante aux hautes températures. Cependant, il existe des températures maximales au-delà desquelles la virulence des pathogènes décroît<sup>[B13]</sup>.

c. Combinaison d'une augmentation de la concentration en CO<sub>2</sub> et des stress biotiques

L'augmentation de la concentration en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère augmente de facto la concentration en CO<sub>2</sub> intercellulaire chez les plantes, ce qui entraîne une fermeture des stomates et diminue la perte en eau au niveau foliaire. Cela a pour conséquence de limiter l'entrée de certains pathogènes via les stomates (voir [Figure 20](#)).

De plus, la fermeture des stomates décroît la conductance stomatique et entraîne ainsi une diminution de la transpiration. Par conséquent, l'humidité relative au niveau de la canopée est moins importante, ce qui confère des conditions moins favorables à certains pathogènes, tels que l'oïdium sur soja. Cela a également

pour conséquence d'augmenter la température au niveau de la canopée, ce qui améliore la performance des pucerons et peut favoriser la propagation de virus au sein de la culture.



**Figure 20** : Effets directs et indirects du CO<sub>2</sub> sur les interactions entrainés par un stress biotique – [Source : B20](#)

Enfin, une concentration élevée en CO<sub>2</sub> est à l'origine d'une diminution de la teneur en nutriments des feuilles et des grains. Cet appauvrissement en minéraux entraîne une dégradation de l'intégrité des membranes, parois cellulaires et cuticule : l'entrée de pathogènes est alors facilitée<sup>[B13]</sup>.

##### 5. Impact sur la filière production de semences

La filière de production de semences, qui est à la base de la production agricole, est également bouleversée par le changement climatique.

A ce titre, SEMAE (l'interprofession des semences et plants en France) a réalisé, en collaboration avec AXA Climate, un travail croisé de projection des évolutions des cultures de production de semences avec les données du GIEC sur les évolutions climatiques : il s'agit d'une analyse des vulnérabilités des productions semencières au regard des évolutions climatiques. L'analyse de risques a été réalisée sur 18 espèces et en découpant le territoire national en 30 bassins de production, via l'attribution d'un score de risque pour chacun des indicateurs pertinents définis au préalable. Ce travail a été présenté lors du Séminaire regroupant le CS du CTPS et les présidents et secrétaires techniques des sections et inter-sections du CTPS, qui s'est tenu le 20 mars 2024.

Les risques principaux identifiés, par ordre d'importance, sont l'eau (accès pour irrigation face aux risques de sécheresse), les températures élevées, puis le froid (associé au risque de gelée tardive).

Il en ressort que d'ici 2050, 2/3 des zones de productions actuelles seront considérées comme à risques climatiques forts ou extrêmes<sup>[C2]</sup>.

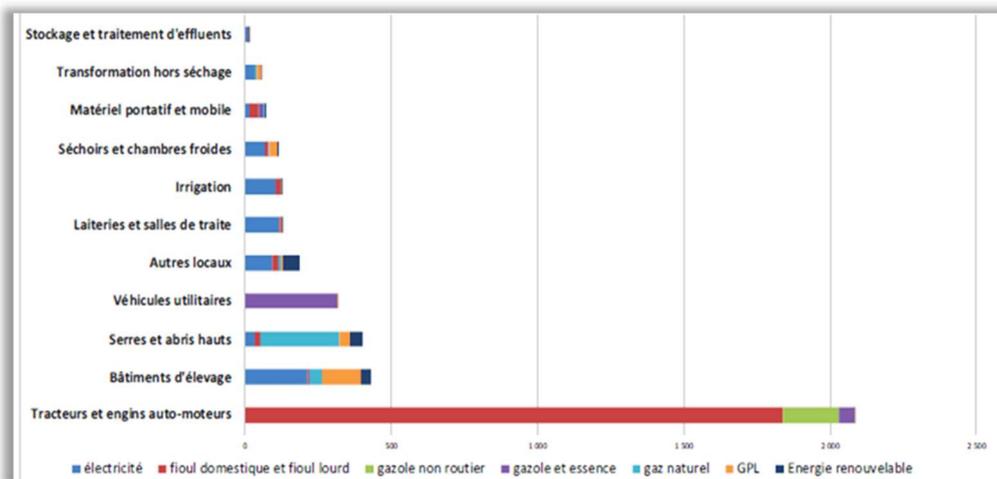
#### **D. Les attentes et défis sociétaux qui accompagnent le changement climatique**

L'agriculture est soumise à des injonctions paradoxales, devant à la fois produire des aliments et préserver la nature. Le changement climatique et ses conséquences sur l'agriculture s'accompagnent également d'un certain nombre d'attentes et de défis sociétaux qui vont peser sur l'agriculture de demain.

## 1. Utilisation de l'énergie

Le secteur agricole français consomme directement environ 4,1 Mtep (mégatonne équivalent pétrole) d'énergie (chiffre 2017), soit 3 % de la consommation d'énergie de la France. Le mix énergétique du secteur est dominé par les produits pétroliers, qui représentent 72 % de la consommation agricole, suivis par l'électricité (18 %). Le gaz représente 6 % des consommations tandis que la part des énergies renouvelables thermiques et des déchets représente 4 % de ce mix énergétique<sup>[B21]</sup>.

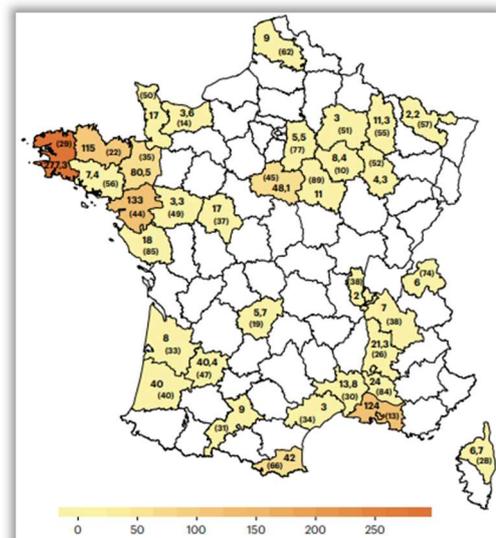
L'alimentation des tracteurs et des engins automoteurs est l'utilisation la plus consommatrice d'énergie, avec 2090 ktep en 2011, soit 53 % de la consommation totale de l'agriculture, suivie par les bâtiments d'élevage et les serres et abris hauts, avec respectivement 430 ktep (11%) et 400 ktep (10%) (répartition présentée sur la Figure 21).



**Figure 21** : Consommation d'énergie par type d'énergie pour chaque usage dans les exploitations agricoles en 2011 – Source : B21

Les exploitations en maraichage présentent le plus haut taux de charges en énergie dans les charges directes, avec 10%, tandis que la viticulture et les fruits et cultures permanentes ont les taux les plus bas (respectivement 3.2% et 4.9%).

En 2021, 1129 hectares de serres chauffées sont recensés en culture de tomate et de concombre en excluant les systèmes hors gel et la production de fraise (Figure 22). La production de tomate concerne 89 % des surfaces et celle de concombre 11 %. Ces surfaces sont en augmentation par rapport à 2016, avec 47,8 hectares supplémentaires (+ 4,4 %), via la construction de serres dans de nouvelles régions, comme la Normandie. Les surfaces augmentent de façon importante dans tout l'ouest de la France (en moyenne + 9 %), et diminuent dans le sud (-5 % en moyenne) <sup>[B22]</sup>. Pour une surface de 1129 hectares, la consommation d'énergie attribuée au chauffage et à l'électricité (hors éclairage) sur l'ensemble du parc de serres chauffées est de 3,8 TWh, soit un équivalent de 0,75 MteqCO<sub>2</sub> (666 teqCO<sub>2</sub>/ha) en termes de gaz à effet de serre.



**Figure 22** : Surface de serres chauffées pour les cultures de tomates et de concombre – Source : B22

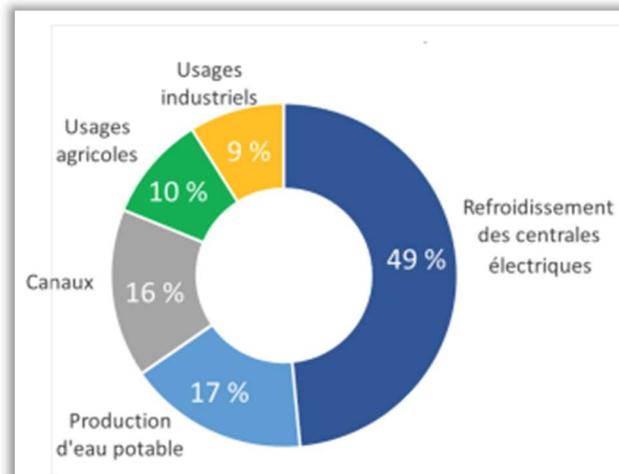
Quelle sera l'acceptation future des consommateurs à consommer des produits agricoles produits sous serre chauffée ?

## 2. Usage de l'eau

L'eau apparaît comme l'un des premiers marqueurs des dérèglements climatiques, et en France, les conséquences de ces dérèglements sont de plus en plus visibles<sup>[B23]</sup>. Les questions de la suffisance, de la qualité et du partage de l'eau sont plus que jamais d'actualité dans le cadre du changement climatique, et cette ressource fait l'objet de conflits d'usage.

Les prélèvements d'eau, qui sont parfois en conflit avec l'alimentation « naturelle » des écosystèmes, sont multiples (voir **Figure 23**) :

- Besoins quotidiens des individus pour leur alimentation et leur hygiène domestique
- Production agricole : irrigation, abreuvement du bétail
- Activités industrielles
- Production électrique via les installations hydroélectriques (12% de la production métropolitaine en 2022 et 53% de l'électricité renouvelable) et pour les centrales thermiques
- Transport fluvial et alimentation des canaux



**Figure 23** : Prélèvements d'eau par usage (en %) pour l'année 2019 en France – Source : B23

En France, l'irrigation est déployée, en 2020, sur 1.8 millions d'hectares (6.8% de la Surface Agricole Utile), et est principalement destinée aux céréales (71%), notamment au maïs. Elle reste très minoritaire par rapport à l'agriculture pluviale<sup>[B5]</sup>. Les pays du sud de l'Europe ont beaucoup plus recours à l'irrigation (Chypre, Malte, Italie, Grèce ont par exemple plus de 30% de leur surface agricole sous irrigation ; l'Espagne et le Portugal se situe autour de 15% de surfaces irriguées). A noter également le fort recours à l'irrigation aux Pays-Bas (environ 30%)<sup>[B4]</sup>.

Des conflits d'usage interne au secteur agricole existent :

- Entre l'élevage (abreuvement des animaux) et l'agriculture (irrigation), notamment lors des périodes de sécheresse et de vagues de chaleur.
- Entre les agriculteurs qui souhaitent continuer à utiliser la même quantité d'eau et les nouveaux entrants qui ont un projet d'installation agricole

Penser à l'irrigation comme levier d'adaptation au changement climatique risque de générer des maladaptations<sup>[B5]</sup>. Par ailleurs, les controverses autour des réserves de substitution de grande capacité, dites « mégabassines » par leurs opposants, remplies en périodes de hautes eaux, y compris en puisant dans les nappes phréatiques si le niveau est suffisant, illustrent ces conflits d'usage. Des controverses scientifiques existent à leur sujet, certaines considérant qu'elles ont des impacts négatifs sur la nature et la biodiversité<sup>[B23]</sup>, alors que d'autres rappellent que le maintien de surfaces évapotranspirantes en période estivale peut avoir de multiples bénéfices induits. Le Haut Conseil pour le Climat encourage à « dimensionner les retenues de substitution aux impacts futurs du changement climatique », afin de ne pas déséquilibrer les écosystèmes locaux dépendant des réserves des nappes phréatiques, et de ne pas aggraver la vulnérabilité de l'ensemble des usagers<sup>[B5]</sup>. Il propose également, tout comme le CESE (Conseil Economique Social et Environnemental), de transitionner entre une irrigation tournée vers un objectif de production maximale vers un système avec une « irrigation de résilience »<sup>[B5, B23]</sup>. L'irrigation de résilience peut être définie comme une « irrigation de précision, en

quantités limitées et exclusivement à des périodes et à des stades phénologiques critiques, en visant des rendements plus modestes »<sup>[B5]</sup>.

Afin de garantir la qualité de l'eau, il est également recommandé de limiter l'usage des pesticides et de réduire la pollution par les nitrates agricoles.

A l'avenir se pose également la question de la réutilisation des eaux usées traitées, à l'image de ce qui est fait en Espagne, en Italie ou en Israël, même si le coût de ces eaux usées traitées est important en raison des besoins en système de traitements complémentaires pour atteindre les normes sanitaires exigées (actuellement, son coût varie de 0.8 à 1€ le m<sup>3</sup> contre 0.05 à 0.20 €/m<sup>3</sup>). La question de l'acceptabilité sociale reste importante à ce sujet<sup>[B23]</sup>.

Se posent les questions suivantes : s'il n'est pas possible d'envisager l'irrigation de toutes les cultures, lesquelles faut-il privilégier ? Les productions alimentaires plutôt que les non-alimentaires ? Celles à destination de la France plutôt que celles pour l'export ? Celles pour l'alimentation humaine plutôt que celles pour l'élevage ? Les espèces de diversification plutôt que les cultures dominantes de l'assolement ?

### 3. Alimentation

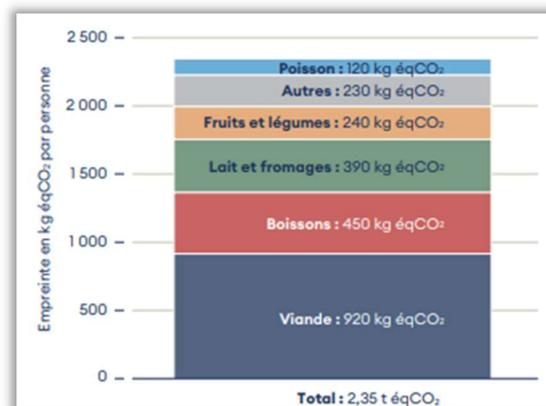
L'agriculture constitue le 1<sup>er</sup> poste d'émission de GES dans l'alimentation des Français (60% pour 84 MT éqCO<sub>2</sub>, devant les industries agroalimentaires et le commerce et la restauration hors domicile (respectivement 25% et 17%).

En 2021, les produits d'origine animale sont responsables de près de la moitié de l'empreinte carbone alimentaire (51%), pour un total de 920 kg éqCO<sub>2</sub> sur 2.35 t éqCO<sub>2</sub> par personne<sup>[B5]</sup> (voir [Figure 24](#) et [Figure 25](#)).

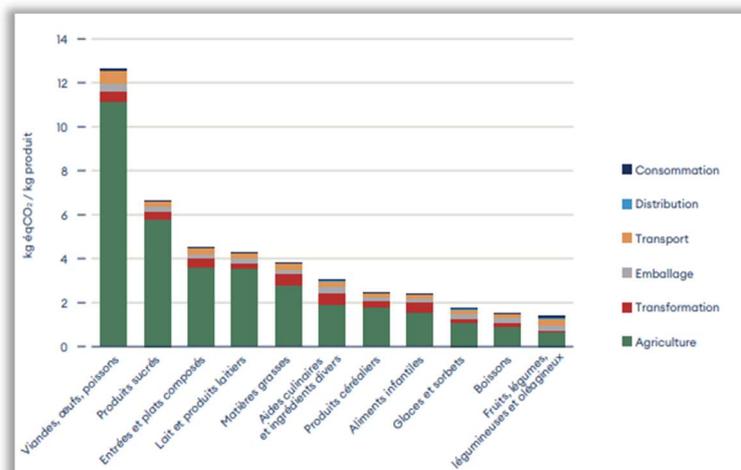
La diminution de la consommation de produits d'origine animale et sa substitution par des protéines végétales constitue le premier levier pour réduire les émissions de l'alimentation.

Par exemple, limiter la consommation de viande rouge à 350 g par semaine permettrait de réduire les émissions de GES liées à l'alimentation de 12 % (à calories constantes), un régime sans viande rouge de 41 % et un régime à deux tiers végétal (deux repas sur trois) de 54 %.

Au niveau mondial, les émissions dues à la production de viande bovine se situent à 50 kg éqCO<sub>2</sub> pour 100g de protéines, contre 0.4 kg éq CO<sub>2</sub> pour 100g de protéines provenant de la production de pois.



**Figure 24** : Empreinte carbone de l'alimentation des Français par type de produits pour l'année 2021 – Source : B5



**Figure 25** : Emissions de gaz à effets de serre de chaque étape de la chaîne du système alimentaire, par groupe d'aliments – Source : B5

La baisse de -30% à -67% de la consommation de protéines animales apparait dans tous les scénarios développés permettant d'atteindre la réduction de 50% des émissions de GES d'ici 2050 (Afterres 2050 de Solagro, Tyfa et Tyfa GES de l'Iddri et les 4 scénarios Transitions 2050 de l'ADEME) <sup>[B5]</sup>.

Il est possible, au niveau européen, de produire suffisamment de nourriture pour la population et d'atteindre les objectifs climatiques en 2050 avec une agriculture entièrement agroécologique, sous réserve d'une baisse de la consommation de protéines animales de l'ordre de 30 %, compensée par une hausse de la consommation de protéines végétale <sup>[B5]</sup>.

## E. Synthèse du WP1

Le changement climatique est à l'œuvre depuis l'ère industrielle, avec une forte accélération depuis la fin de la seconde guerre mondiale, et ses effets ne sont plus à démontrer. L'augmentation moyenne des températures à l'horizon 2050 sera de l'ordre de +2 à +3°C en France par rapport à l'ère préindustrielle, et les aléas climatiques vont être de plus en plus marqués, fréquents et variés (sécheresse, vagues de chaleur, gel tardif, orages et grêles ...), augmentant encore l'imprédictibilité climatique. L'agriculture, secteur d'activité émetteur de gaz à effet de serre, est sensible au changement climatique : l'augmentation des températures va entraîner des changements phénologiques, un raccourcissement des cycles de culture ou encore une moindre efficacité de la photosynthèse ; l'augmentation de la concentration en CO<sub>2</sub> présente un risque de diminution du contenu protéique des grains des plantes céréalières en C3 ; les vagues de chaleur et la sécheresse vont inciter à un recours plus important à l'irrigation pour ne pas perdre les cultures et pour atténuer l'effet des variations interannuelles ; les ravageurs des cultures vont migrer, avec de nouveaux bioagresseurs pour les agricultures françaises, et les bioagresseurs déjà présents vont subir des évolutions de leurs cycles biologiques. Les combinaisons de ces stress sont difficiles à anticiper, et la réaction des cultures à ces combinaisons de stress reste encore mal connue, mais certaines cultures sont déjà impactées. Des évolutions des zones de culture et adaptations nécessaires des systèmes de culture doivent être réfléchies. Par ailleurs, le changement climatique n'est pas le seul facteur qui va influencer l'agriculture de demain ; il s'accompagne de nombreux défis et attentes sociétaux, tels qu'une diminution du recours aux énergies fossiles, une évolution des modes de protection des cultures avec moins de pesticides de synthèse, des choix relatifs aux usages de l'eau et de son utilisation à des fins d'irrigation, un changement dans l'alimentation vers plus de végétalisation .... Le futur de l'agriculture apparaît donc relativement incertain, mais il est très vraisemblable qu'il ne ressemblera pas au système actuel.



Figure 26 : Ensemble des leviers d'adaptation au changement climatique – Source : S16

La réponse à ces changements ne peut se résumer au changement d'une seule pratique ; les leviers d'action sont nombreux, et le matériel végétal est l'un d'entre eux : il s'intègre dans des stratégies d'adaptation globales<sup>[S16]</sup> (voir Figure 26).

L'ensemble des éléments de cette première partie nous amène à analyser comment l'amélioration des plantes peut contribuer, conjointement et en synergie avec l'ensemble des autres leviers pour atténuer et/ou s'adapter au changement climatique.

## WP2 : Quels apports attendre de la sélection et de l'organisation de la filière Semences et Plants ?

De manière générale, les espèces végétales peuvent répondre aux nouvelles conditions environnementales induites par le changement climatique en s'adaptant sous l'effet de la sélection (naturelle ou artificielle), en ajustant leur phénotype par plasticité, ou en migrant pour suivre les conditions auxquelles elles sont adaptées<sup>[B20]</sup>. Ces réponses sont dépendantes de la variabilité génétique adaptative des populations, de la plasticité et des capacités migratoires de chaque espèce, et de la force de sélection (vitesse du changement climatique). Chez les plantes cultivées, la gestion par l'homme des ressources génétiques et de la sélection permet de maximiser ces réponses, en intégrant également l'évolution des pratiques culturales, elle-même impactée par le changement climatique.

### A. Préciser la cible pour l'innovation et la sélection variétale pour faire face au changement climatique

Lors du séminaire du 20 mars 2024 réunissant les membres du CS du CTPS, les présidents et secrétaires techniques des sections et inter-sections du CTPS, il a été demandé à chacun de préciser, en quelques mots, la cible pour l'innovation variétale face au changement climatique. Le nuage de mots ci-contre (Figure 27) permet de représenter les idées qui sont majoritairement ressorties :

- Les concepts de « **résilience** » et de « **diversité** » ont été les plus cités, suivi par ceux « d'adaptation », de « souplesse » et de « robustesse ».
- L'action « **d'améliorer l'existant** » a été particulièrement mise en avant, notamment concernant « **l'information** » produite et diffusée
- D'un point de vue technique, « **l'envirotypage** » ressort de manière importante, tout comme « **l'évaluation multicritère** » et la notion de « **local** ».

En biologie, le terme de « **résilience** » renvoie à la persistance d'un système écologique lorsqu'il est confronté à une ou plusieurs perturbations, parfois imprévisibles, et à sa capacité à absorber les changements. Le concept de résilience s'applique à décrire et à comprendre des transformations sur le long-terme avec des périodes marquées par des crises significatives, en intégrant une approche temporelle et un processus de récupération (voir Figure 28 et Figure 29) <sup>[B25]</sup>.



Figure 27 : Nuage de mots reprenant les idées majoritairement ressorties lors du séminaire du 20 mars 2024 en réponse à la demande : « Précisez, en 2 mots, la cible pour l'innovation variétale face au changement climatique »

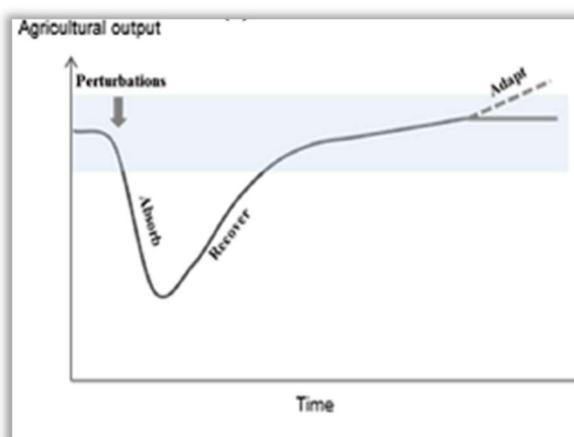


Figure 28 : Illustration du concept de résilience – Source : B25

Lors d'une étude portant sur 1700 articles se rapportant à des simulations de rendements dans le contexte du changement climatique, Challinor et al. ont conclu que l'amélioration des variétés constituaient le levier le plus efficace pour l'adaptation au changement climatique<sup>[B26]</sup>, bien que ce ne soit pas le seul. Ainsi les changements de pratiques culturales, incluant les cultures en mélanges de variétés ou d'espèces, sont d'autres leviers d'importance, qui impactent les objectifs de sélection. L'introduction de nouvelles espèces (migration) est une autre composante de la résilience. Dans son

**Table 1** Summary of the main differences between the concepts of stability, robustness, vulnerability and resilience

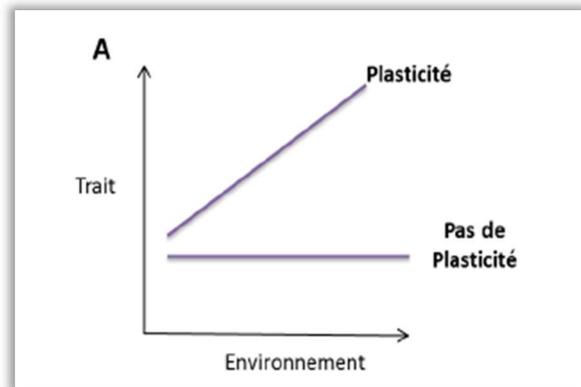
Concepts	Definition in agricultural context	Nature of the system studied What part of the system is studied?	Agricultural output To maintain what?	Perturbations Against what kind of perturbations?
Stability	Constancy of agricultural outputs over long periods of time or across various spatial environments	Biological components of agricultural systems	Individual features of biological components	Not explicitly defined
Examples	Brancourt-Hulmel (1999) Tilman et al. (2002) Govaerts et al. (2005) Devictor and Jiguet (2007)	Wheat genotypes Cereal crops Maize-wheat rotation (Mexico) Farmland bird communities (France)	Wheat yield Agricultural production Maize and wheat yields Farm biodiversity	– – – –
Robustness	Ability to maintain desired levels of agricultural outputs despite the occurrence of perturbations	Biological and technical components of agricultural systems	Individual features of biological and technical components	Short-term and specified perturbations
Examples	Mosnier et al. (2009) Dourmad et al. (2010) ten Napel et al. (2011)  Sabatier et al. (2013)	Livestock systems (France) Pigs Pig production unit  Cacao agroecosystem (Indonesia)	Farmers' income Sow productivity Various features (pig mortality, quality of meat,...) Cacao productivity	Weather and price fluctuation Multifactorial diseases Short-term variation in costs of feed, water, medication and bedding material Pest outbreak
Vulnerability	Degree to which agricultural systems are likely to be harmed due to perturbations	Biotechnical and social components of agricultural systems	Individual and integrated features of agricultural systems	Specified perturbations
Examples	Jalan and Ravallion (1999) Luers et al. (2003) Reidsma and Ewert (2008) Simelton et al. (2009)	Households (China) Farms in Yaqui Valley (Mexico) European farms Rice, wheat and corn production (China)	Household income Wheat yield Regional wheat productivity Provincial harvest production	Risk-market failures Drought Climate variability Drought
Resilience	Ability to absorb change and to anticipate future perturbations through adaptive capacity	Biotechnical and social components of agricultural systems	Integrated features of agricultural systems	Specific perturbations to unpredictable changes
Examples	Damhofer (2010)  David et al. (2010)  Astigarraga and Ingrand (2011)  Rodriguez et al. (2011)	Family farms (Austria)  Organic farms (France)  Limousin beef systems (France)  Farms in Australia	Adaptability and transformability of the farms Flexibility of organic farms Flexibility to match different factors of uncertainty Farm profit	Changes in the economic and political framework Market fluctuations and regulatory changes Market variations and climatic fluctuations Climate change scenarios

**Figure 29** : Principales différences entre les concepts de stabilité, robustesse, vulnérabilité et résilience – Source : B25

article, Kopeć définit d'ailleurs comme l'un des principaux objectifs de sélection dans le futur, les **cultures résilientes face au climat** (Climate-Resilient Crops), qu'il conçoit comme étant « des espèces ou des variétés qui font preuve d'une résistance accrue face aux conditions environnementales, dans l'intention de maintenir ou d'augmenter les rendements sous conditions de stress »<sup>[B27]</sup>.

## B. Plasticité phénotypique

La plasticité phénotypique se définit comme la capacité d'un génotype donné à exprimer plusieurs phénotypes, en fonction des conditions de l'environnement (voir [Figure 30](#))<sup>[B24, B28]</sup>. Cet effet de l'environnement agit principalement durant une période critique du développement, et le phénotype est généralement irréversible. Cependant, le concept de plasticité phénotypique peut englober la notion d'acclimatation, phénomène réversible qui correspond au remodelage des systèmes physiologiques en réponse aux conditions de l'environnement et qui vise à diminuer l'impact des nouvelles conditions de l'environnement sur l'organisme<sup>[B28]</sup>.



**Figure 30** : Représentation schématique de la plasticité (ou non) d'un trait – Source – B30

Une adaptation correspond à un phénotype qui améliore la survie ou la reproduction de l'organisme (= la fitness) relativement aux phénotypes initiaux dans un environnement donné. Le phénotype se décompose en différents traits (caractéristiques) morphologiques ou physiologiques, les traits quantitatifs pouvant prendre différentes valeurs. Un trait (ou une valeur de ce trait) est défini comme « adaptatif » s'il a la capacité de répondre à une variable de l'environnement durant le développement en augmentant la fitness. Dans le cas contraire, le trait est mal-adaptatif<sup>[B28]</sup>.

De manière générale, la sélection naturelle favorise les organismes qui présentent une plasticité avec un faible ratio coût/bénéfices, c'est-à-dire que le bénéfice de l'expression de la réponse plastique surpasse son coût<sup>[B29]</sup>, mesuré dans une variabilité donnée de l'environnement.

Les réponses d'un trait plastique peuvent être visibles (modifications à la surface des feuilles) ou invisibles (changements dans l'expression des gènes), instantanées ou non, continues ou discrètes, réversibles ou non, adaptatives, neutres ou mal-adaptatives, actives ou passives. La mesure de la plasticité phénotypique à l'échelle d'une plante entière est la somme de toutes les réponses moléculaires induites, c'est-à-dire de la réponse d'un ensemble de traits plastiques à un changement de l'environnement<sup>[B29]</sup>.

## C. Espace phénotypique : résultante de la plasticité et de la variabilité génétique

Il existe, entre certains traits, des compromis et des contraintes qui limitent le nombre de combinaisons phénotypiques possibles. En conséquence, une approche trait par trait ne suffit pas pour analyser la variabilité phénotypique possible : il faut raisonner en combinant entre eux les  $n$  traits considérés afin qu'ils forment un espace à  $n$  dimensions regroupant ainsi les formes et fonctions phénotypiques possibles. C'est ainsi que l'on définit l'espace phénotypique (voir [Figure 31](#))<sup>[B30]</sup>.

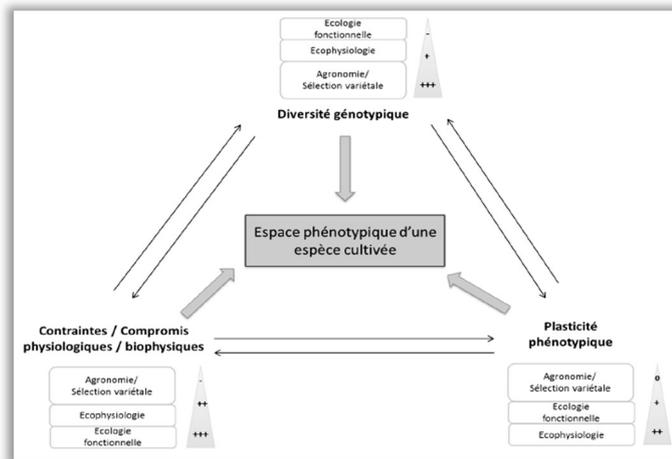
Concept développé par les écologues, l'espace phénotypique est généralement utilisé pour comparer les différentes espèces d'une communauté ou d'un arbre phylogénétique<sup>[B31, B32]</sup>. Lorsque l'espace phénotypique est basé sur des traits adaptatifs, l'espace des traits définit également des adaptations à des niches environnementales. Ainsi, des espèces qui sont très distantes dans l'espace phénotypique sont généralement dans des niches différentes, et peuvent avoir des relations de complémentarité, contrairement aux espèces qui sont en compétition sur une même niche. Enfin, ces espaces

phénotypiques peuvent définir des adaptations environnementales, notamment pédoclimatiques [B33, B34]. A l'échelle de l'espèce, les variabilités phénotypiques dues à la plasticité et à la variabilité génétique définissent un espace phénotypique intraspécifique. Cet espace peut également servir à comparer les niches de différentes espèces ou populations dans une espèce, ou l'adaptation à différents environnements [B35, B36, B37].

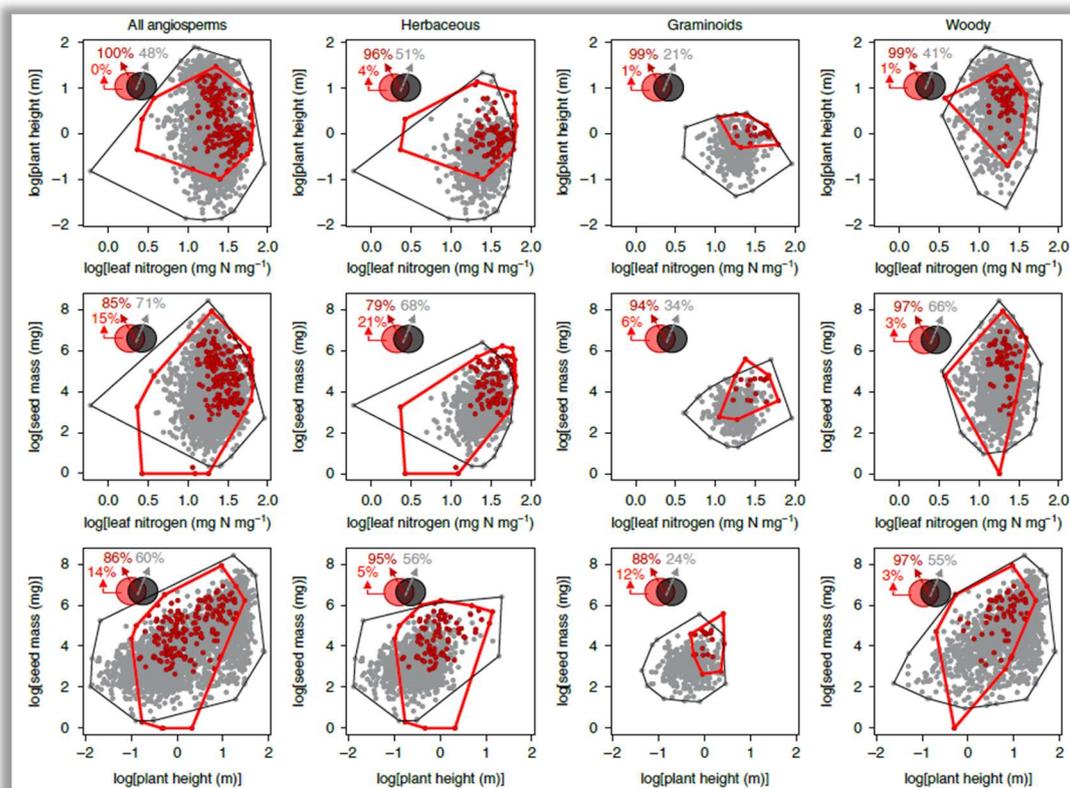
Pour un environnement donné, l'adaptation d'une espèce sera d'autant plus difficile que son espace phénotypique est éloigné des espèces qui y sont adaptées.

L'espace phénotypique peut également être utilisé pour représenter la

distribution des espèces domestiquées au sein de la diversité des espèces sauvages, comme l'ont illustré Milla et al. sur les 3 traits suivants : teneur en azote des feuilles, hauteur du couvert végétal et masse sèche de la semence. Le graphique ci-dessous (Figure 32) permet de visualiser l'espace phénotypique des espèces sauvages (en gris) et celui des espèces domestiquées (en rouge).



**Figure 31 :** Représentation schématique de la notion d'espace phénotypique d'une espèce cultivée, défini par la plasticité phénotypique, la diversité génétique de l'espèce et l'ensemble des contraintes et compromis physiologiques et biologiques existants – Source : B30



**Figure 32 :** Espace phénotypique des plantes Angiospermes sauvages (points gris) et cultivées (point rouge). Les cercles en haut à gauche correspondent au pourcentage de plantes domestiquées hors de l'espace phénotypique des plantes sauvages (rouge clair), de pourcentage de plantes domestiquées à l'intérieur de l'espace phénotypique des plantes sauvages (rouge foncé), et de l'espace phénotypique des plantes sauvages occupé par les plantes domestiquées (gris). – Source : B38

Le chiffre en rouge clair indique le pourcentage d'espèces domestiquées hors des limites de l'espace phénotypique des espèces sauvages, et le chiffre en gris correspond à l'espace phénotypique des espèces sauvages occupées par les espèces domestiquées. On constate que les graminées domestiquées n'occupent qu'une faible partie de l'espace phénotypique défini par les espèces sauvages (de 21 à 34% selon la combinaison de traits considérés), tandis que pour les espèces ligneuses, de 41 à 66% de l'espace phénotypique défini par les espèces sauvages est occupé par les espèces domestiquées.

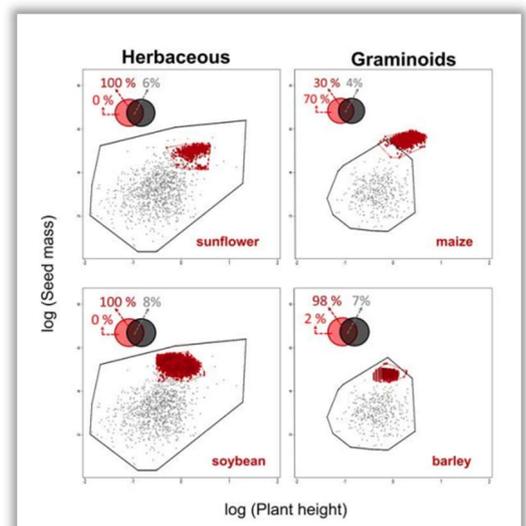
Pour les espèces non ligneuses, les plantes domestiquées se concentrent principalement sur une extrémité de l'espace phénotypique des espèces domestiquées, avec des plantes plus grandes, des semences plus grosses et des teneurs en azote plus élevées que pour l'ensemble des espèces sauvages. Les espèces domestiquées restent, de manière générale, à l'intérieur de l'espace phénotypique défini par les espèces sauvages <sup>[B38]</sup>.

Il est à noter que dans la [Figure 32](#), l'analyse de l'occupation de l'espace phénotypique est réalisée au niveau interspécifique. Une analyse à l'échelle intraspécifique permet quant à elle de regarder la diversité plastique au sein d'une même espèce, comme c'est le cas dans la [Figure 33](#), toujours tirée de l'étude de Milla et al.

Il est notamment intéressant de constater que si la diversité intraspécifique concernant la taille des plantes et la masse des semences de tournesol, de soja et d'orge se concentre à l'intérieur de l'enveloppe des espèces sauvages, le maïs présente pour sa part une diversité intraspécifique fortement située à l'extérieur des limites de l'espace interspécifique des graminées sauvages.

Ces exemples montrent comment la description des espaces phénotypiques peut être mobilisée pour comparer des espèces entre elles, ou comparer des ressources génétiques disponibles dans une espèce, et aller chercher des variétés ou espèces d'intérêt pour certaines adaptations.

L'importance de considérer la plasticité adaptative dans les programmes de sélection a été mise en avant ces dernières années en réponse à l'instabilité environnementale <sup>[B29]</sup>. Dans une étude de 2018, Matesanz et Milla ont comparé les performances de génotypes sauvages avec ceux de génotypes domestiqués sur plusieurs espèces (chou, tournesol, tomate, blé dur, maïs, pois) : dans des conditions environnementales favorables, les génotypes domestiqués étaient plus performants que les génotypes sauvages, mais ils étaient davantage pénalisés en conditions stressantes. Cependant, l'expression de la plasticité était similaire entre les génotypes sauvages et domestiqués, et variait selon les traits considérés. Cela souligne la nature complexe des réponses plastiques et leurs interactions avec l'environnement <sup>[B29, B39]</sup>.



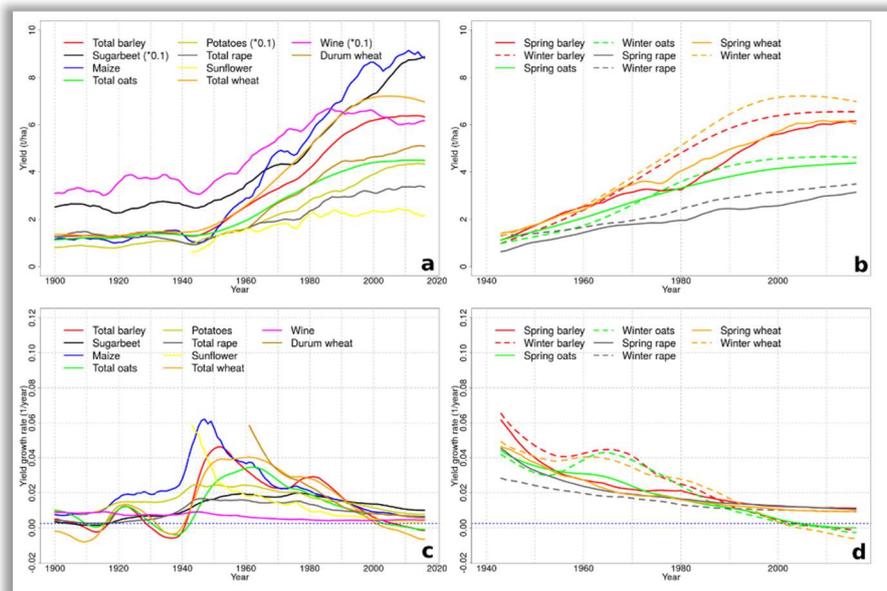
**Figure 33** : Variation intraspécifique de la masse des semences par rapport à la hauteur des plantes pour quatre espèces dans le contexte de variation interspécifique globale pour les mêmes traits – Source : B38

## D. Retour sur le progrès génétique

### 1. Evolution des rendements

Jusqu'à présent, les programmes de sélection visaient principalement à maximiser le rendement utile des cultures sous les conditions climatiques standards, et à introduire des résistances aux pathogènes<sup>[B40]</sup>.

Dans leur étude, Schauburger et al. ont analysé l'évolution des rendements et de leur stabilité en France, sur la période 1900 – 2016, pour dix espèces différentes (orge, blé dur, blé tendre, maïs, avoine, pomme de terre, colza, betterave sucrière, tournesol et vigne), dont les résultats sont présentés dans la figure ci-dessous (Figure 34)<sup>[B41]</sup>.



**Figure 34** : Tendances et taux de croissance des rendements nationaux de quelques cultures françaises – Source B41

Pour l'ensemble des espèces, on constate une augmentation des rendements moyens entre 1900 et 2016, qui peut se découper en trois périodes distinctes : de 1900 à 1950, les rendements sont bas et évoluent peu, puis de 1950 à 1990, la progression des rendements est importante, et enfin, depuis 1990, une stagnation des rendements est constatée pour la majorité des cultures (à l'exception du maïs et de la betterave sucrière qui continuent de progresser). L'année charnière dans la stagnation des rendements moyens se situe entre 1997 et 2004. Il faut cependant noter que la stagnation des rendements est plus importante dans les zones qui présentent les plus hauts rendements moyens.

Cette étude met en évidence, pour l'ensemble des espèces de l'étude, une corrélation entre les évolutions des rendements et les évolutions de l'apport en fertilisation minérale azotée (corrélation de Pearson  $r=0.72$ ). Il est également mis en évidence l'existence d'un clustering géographique des niveaux de rendements pour certaines espèces (orge d'hiver et de printemps, avoine, pomme de terre, blé tendre et blé dur). Les clusters avec les plus hauts niveaux de rendements sont localisés dans le nord de la France, ce qui est cohérent avec les niveaux de fertilisation de cette zone.

Néanmoins, la disponibilité en fertilisation, en réponse à la croissance de la biomasse, n'est pas la seule raison pour laquelle les rendements ont augmenté : à cela s'ajoutent le développement de nouvelles variétés, la modification des caractéristiques du sol ou encore les autres pratiques culturales.

De manière générale, on constate une augmentation de la variabilité absolue des rendements (écart-type) mais une diminution de la variabilité relative (coefficient de variation) depuis 1900, ce qui s'explique par l'amélioration du potentiel génétique (et donc des rendements moyens) et par une

meilleure prévention contre les événements extrêmes pour les cultures par une conduite intensive (irrigation, fertilisation, traitements phytosanitaires).

La stagnation des rendements peut être expliquée par différentes hypothèses<sup>[B41]</sup> :

- Atteinte d'un potentiel maximum physiologique des rendements
- Impact du changement des conditions climatiques
- Décisions politiques (incitations financières, quota, réglementation...) pouvant contribuer à une baisse des investissements en sélection ou d'utilisation d'intrants
- Changement dans les rotations des cultures
- Augmentation du coût marginal des interventions culturales sans compensation par les gains de rendement
- Progression de la part cultivée en « agriculture biologique », dont les rendements sont souvent inférieurs aux cultures conventionnelles

Cette étude peut être complétée par les données de la FAO, qui note également une stagnation des rendements de blé depuis les années 1990 en France<sup>[S17]</sup>. La part du climat dans ce constat est estimé entre 30 et 70%, l'autre cause étant une baisse de la fourniture d'azote, que ce soit en raison des économies d'intrants ou de la diminution des légumineuses en tant que précédent cultural.

L'évolution du rendement est l'une des illustrations du progrès génétique, mais elle englobe également l'ensemble des modifications des pratiques culturales. Le progrès génétique se mesure également à travers d'autres critères que le rendement : résistances aux maladies et bioagresseurs, qualité des produits, tolérances aux stress abiotiques ...

Par exemple, le progrès génétique en tournesol est estimé à +0.3 q/ha par an pour le rendement en grain, et de 0.3% par an pour la teneur en huile. Le travail de sélection a également permis de faire évoluer les résistances aux maladies : si avant 1990, 85% des variétés étaient jugées sensibles ou très sensibles au phomopsis, elles ne sont plus que 5% à l'être chez les variétés inscrites ces 20 dernières années<sup>[R1]</sup>.

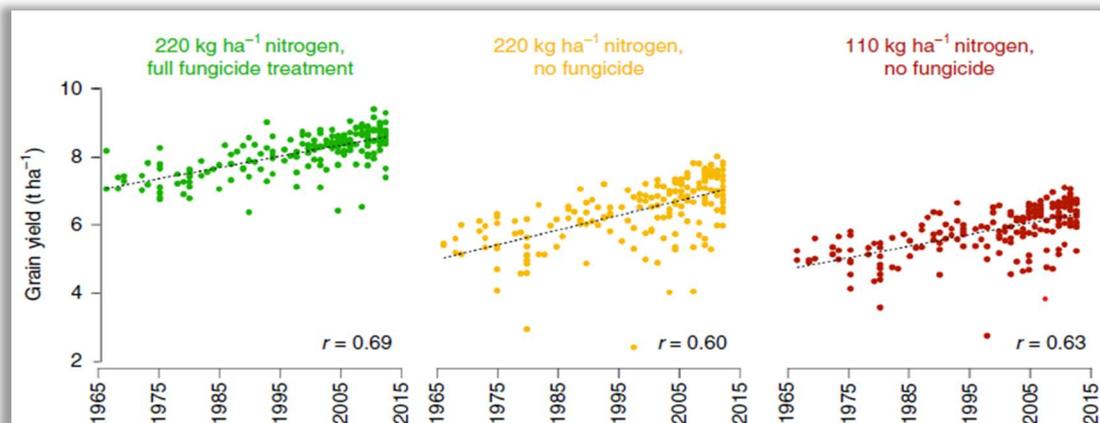
En pois d'hiver, le travail de sélection a permis d'acquérir une meilleure tolérance au froid, d'une meilleure tenue de tige et d'une teneur en protéines qui tend à progresser dans les nouvelles variétés<sup>[R2]</sup>. On constate néanmoins une chute régulière du rendement dans les parcelles agricoles, malgré un accroissement de celui-ci dans les essais : cette chute est multifactorielle avec beaucoup de facteurs techniques, mais on peut s'interroger sur les environnements dans lesquels le progrès génétique est évalué. On constate en particulier un fort déplacement de la zone de culture vers des parcelles à plus faible potentiel (sols plus superficiels), sans que cela ne se traduise dans les réseaux d'essais du CTPS. On constate des gains de rendement permis par les nouvelles variétés de plus de 10% en féverole d'hiver entre 2001 et 2013, et de 10 à 15% en féverole de printemps entre 2002 et 2017<sup>[R2]</sup>. Depuis 2018, la France connaît une augmentation importante du nombre de variétés inscrites en pois chiche, avec peu d'amélioration de rendement mais des augmentations du calibre, un critère important pour les débouchés de cette culture<sup>[R2]</sup>.

## 2. Évaluation du progrès génétique et des traits variétaux impliqués

Par le passé, l'augmentation des rendements a souvent été associée à une augmentation de l'accès aux ressources (azote, eau) plutôt qu'au progrès génétique. Cela a parfois pu être interprété comme le fait que les variétés élites modernes auraient une efficacité réduite pour l'utilisation de l'eau et de l'azote, comme l'explique Snowdon *et al.*<sup>[B40]</sup> dans sa publication autour de la question « le progrès génétique pour l'amélioration du rendement a-t-il diminué la diversité génétique pour l'adaptation au climat dans les pools génétiques des plantes cultivées ? », mais des études empiriques montrent l'inverse. Il est aussi avancé qu'avec l'optimisation d'engrais et de produits phytosanitaires, les variants génétiques associés à une performance en conditions suboptimales seraient progressivement éliminés par le phénomène de dérive génétique car ils n'apporteraient pas d'avantage sélectif. Cependant, plusieurs études concluent, après analyse rétrospective sur le progrès génétique, que les traits

génétiques liés notamment à la durabilité (résistance aux maladies, utilisation des ressources en nutriments ou en eau) n'ont pas disparu des nouvelles variétés.

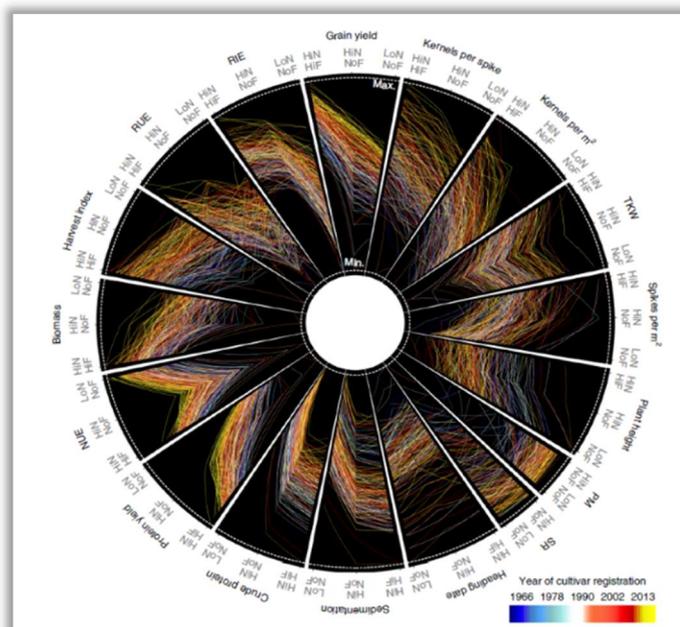
Ainsi, dans l'étude réalisée par Voss-Fels *et al.* [B42], l'analyse d'un panel de près de 200 variétés élites de blé d'hiver de l'Ouest de l'Europe, mis sur le marché au cours des 50 dernières années, et représentatives des variétés les plus performantes au moment de leur inscription a été réalisée. Ces variétés ont été évaluées en 6 lieux d'essais pendant plusieurs années pour étudier le progrès génétique sur le rendement, mais aussi sur d'autres caractères, tels que les composantes du rendement, la qualité du grain, les résistances ... Pour évaluer la capacité d'adaptation des variétés à des environnements défavorables ou suboptimaux, ces essais incluaient des modalités avec un apport d'azote minimal, ou encore sans traitement fongicide.



**Figure 35** : Performances de rendement en grains de 191 cultivars européens de blé d'hiver au cours des 50 dernières années par rapport à l'année d'enregistrement du cultivar pour 3 conduites culturales (dose d'azote et traitement fongicide) – Source : B42

Cette étude a démontré un gain génétique linéaire au cours du temps pour le rendement, y compris en conditions suboptimales (voir la Figure 35). Des gains ont également été observés pour des traits qui faisaient l'objet de sélection (résistances aux maladies fongiques, qualité du grain, index de récolte, nombre de grains par épi...) et pour d'autres caractères pour lesquels les sélectionneurs n'avaient *a priori* pas les ressources pour les travailler (efficacité de l'utilisation de l'azote, efficacité de la photosynthèse ...), dont l'héritabilité est faible et la génétique complexe (voir Figure 36).

Une explication à cela est que ces traits, qui permettent une meilleure utilisation des ressources, font partie intégrante de la performance globale des variétés. Il faut par ailleurs rappeler qu'il existe des compromis entre certaines caractéristiques, et que l'art de la sélection repose sur la capacité à sélectionner les combinaisons les plus appropriées.

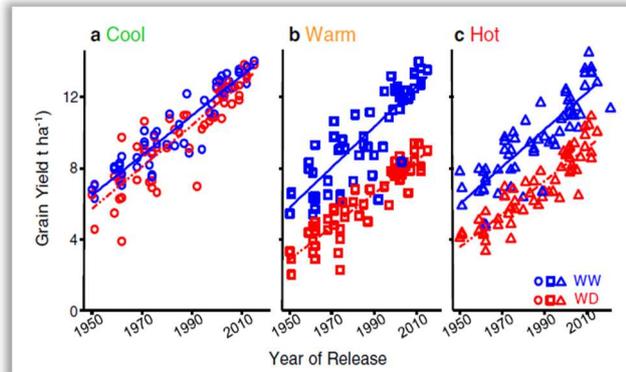


**Figure 36** : Représentation graphique du progrès génétique sur blé d'hiver en Europe. Pour chaque trait, trois conduites culturales sont représentées (HiN : haut niveau d'azote ; LoN : bas niveau d'azote ; HiF : protection fongicide ; NoF : pas de protection fongicide). Le cœur de la figure correspond au niveau minimale de chacun des traits, l'extérieur étant le niveau maximal. – Source : B42

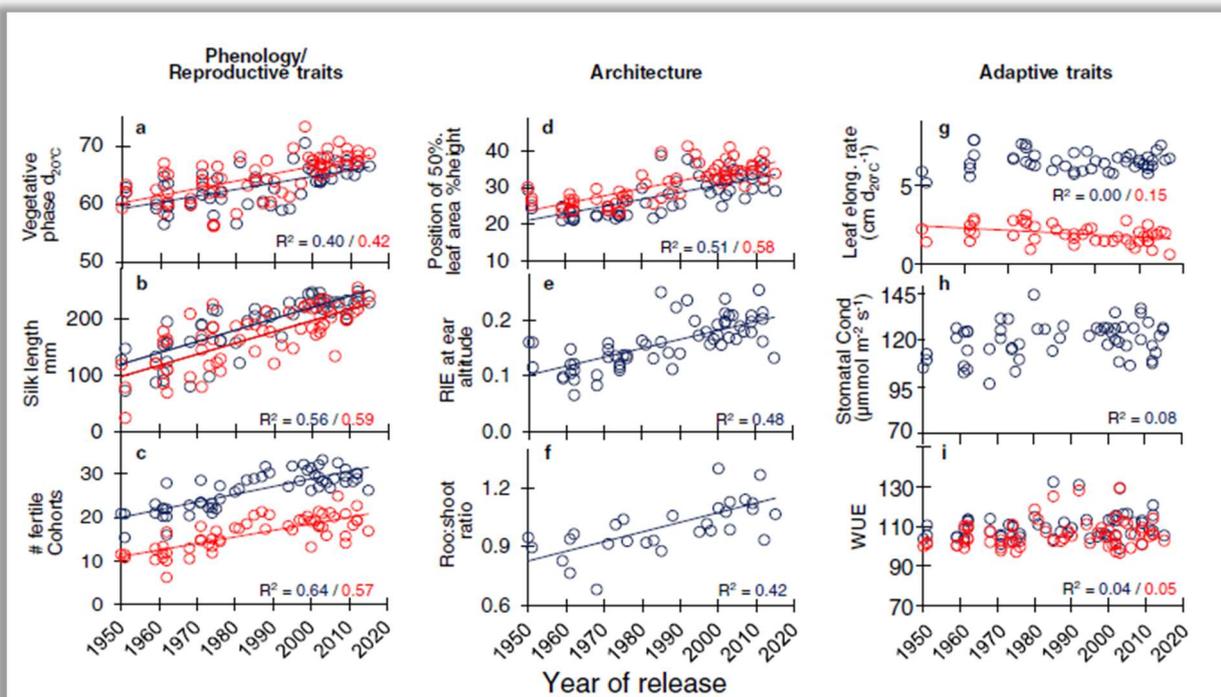
Comprendre et cibler ces traits pourraient ainsi, à l'avenir, se révéler prometteur pour accélérer le progrès génétique pour la stabilité du rendement [B40, B42].

Des constats similaires ont été faits dans l'étude de Welcker *et al.*, portant sur 66 hybrides de maïs parmi les plus commercialisés en Europe, pour des années d'inscription allant de 1950 à 2016 [B43].

Les essais ont été placés à travers l'Europe, dans les zones de culture où l'on retrouve cette espèce, et classés en 6 scénarios environnementaux, fonction de la température moyenne et du statut hydrique. On constate sur la [Figure 37](#) que le progrès génétique est constant et important, quel que soit le régime de température et le statut hydrique, avec un gain moyen annuel de 101 kg par hectare et par an. Ce gain de rendement est majoritairement lié à l'augmentation du nombre de grains par plante, plus qu'à l'augmentation du poids moyen des grains.



**Figure 37** : Représentation graphique du progrès génétique sur maïs hybrides dont la date de 1<sup>ère</sup> commercialisation est comprise entre 1950 et 2016, et testés sous différentes conduites culturales (WW : irrigué ; WD : déficit hydrique) – Source : B43



**Figure 38** : Evolution des traits phénologiques, reproductifs, architecturaux et adaptatifs au cours des années de mise en marché d'hybrides de maïs selon deux conduites culturales différentes (bleu : irrigué ; rouge : déficit hydrique) – Source : B43

Les auteurs ont par ailleurs constaté ([Figure 38](#)) que, malgré une durée de cycle constante pour l'ensemble des variétés indépendamment de la date d'inscription, la durée de la période végétative a augmenté tandis que la période de remplissage des grains a diminué. Etant donné que le poids moyen des grains est resté stable, cela signifie que la vitesse de remplissage des grains a été améliorée par la sélection. La prolongation de la phase végétative pour les variétés les plus récentes permet l'augmentation du nombre de cohortes ovarienne développée le long de l'épi. La croissance des soies et le nombre de soies extrudées augmentent également pour les variétés les plus récentes, ce qui

contribue à l'augmentation de la proportion de cohortes ovariennes qui deviennent des grains. En revanche, le nombre de grains par cohorte reste stable pour toutes les années d'inscription. Par ailleurs, l'architecture aérienne des plantes de maïs est également modifiée au cours des années de sélection, permettant ainsi une meilleure interception de la lumière malgré une surface foliaire constante (ou en légère diminution).

En revanche, les traits adaptatifs, qui varient sur de courtes périodes en réponse aux conditions environnementales, ne présentent pas d'évolution entre les années d'inscription (conductance stomatique, efficacité de l'utilisation de l'eau), bien que la diversité génétique existe : ces caractères n'ont pas été affectés par la sélection au cours du temps.

Ces observations concernant la sélection de traits constitutifs mais pas de traits adaptatifs sont confirmées par des analyses génétiques, et les auteurs supposent que cela est lié à la stabilité des effets des traits constitutifs alors que les traits adaptatifs correspondent à des QTLs avec des effets alléliques dépendant des conditions environnementales.

Les auteurs soulignent que les traits constitutifs associés au rendement ne peuvent pas être améliorés indéfiniment et risquent d'atteindre leurs limites dans un futur proche. En revanche, l'exploration des caractères adaptatifs reste une piste à explorer pour le développement de nouvelles variétés dans le contexte du changement climatique, avec de potentiels effets négatifs sur le rendement en conditions favorables mais capables de faire face à des conditions climatiques extrêmes.

## **E. Besoins de la sélection pour faire face au changement climatique**

### **1. Retour des sections sur les besoins de la sélection**

L'une des questions du questionnaire adressé aux sections et inter-sections du CTPS visait à recueillir les traits critiques dans le cadre du changement climatique qui, à leur connaissance, sont déjà sous sélection, ou qui ne le sont pas encore mais devraient l'être pour faire face au changement climatique, parmi une liste préétablie qui pouvait être complétée si besoin.

Une synthèse des réponses est présentée dans les Tableau 2 et Tableau 3 (en vert, traits déjà travaillés – en jaune, traits à travailler dans le futur).

Pour les espèces soumises à épreuves VATE, il apparaît que la majorité des traits fait déjà l'objet d'un travail de sélection, en particulier l'amélioration du potentiel de rendement, la résistance aux maladies et aux ravageurs, la maturité précoce, la tolérance à la chaleur ou encore l'architecture racinaire. Ponctuellement, ces traits peuvent avoir été jugés comme « à travailler dans le futur » pour certaines espèces.

Selon les réponses transmises, le trait principal à travailler dans le futur pour l'adaptation au changement climatique, et qui ne fait pas encore l'objet de travail de sélection pour la plupart des espèces soumises à épreuve VATE, concernerait **l'utilisation de l'eau** (trait qui peut être travaillé sous différents angles suivant les objectifs et contextes pédoclimatiques) <sup>[B44, B45]</sup>.

Pour les espèces fruitières, légumières et plantes ornementales, à parfum, aromatiques et médicinales (POPAM), les traits déjà sous sélection concernent principalement le maintien de la qualité des produits, les résistances aux maladies et ravageurs, ainsi que les floraisons et maturités (précoces et tardives).

Les traits principaux à travailler dans le futur pour l'adaptation au changement climatique, et qui ne fait pas encore l'objet de travail de sélection pour ces espèces non soumises à épreuve VATE, seraient **la tolérance à la chaleur et à la sécheresse**, ainsi que **l'efficacité de l'utilisation de l'eau et l'architecture racinaire**.

**Tableau 2** : Tableaux de réponses des différentes sections (pour lesquelles il existe une épreuve VATE) et commissions inter-sections du CTPS à la question : « Dans le contexte du changement climatique, quelles sont selon vous les anticipations qu'il faut prévoir dès à présent en termes de traits de sélection ? Indiquez si le trait est déjà sous sélection ou devrait l'être »

Traits	Céréales	Sorgho	Maïs	Vigne	Tournesol	Soja	Betterave sucrière	CISPS	Pomme de terre	Chanvre	Lin fibre	Lin oléagineux	Plantes protéagineuses	Colza	Plantes fourragères Et à gazon
Amélioration du potentiel de rendement	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Résistance aux maladies	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X
Maturité précoce	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	
Résistances aux ravageurs	X	X		X	X		X	X	X	X	X		X	X	X
Tolérance à la chaleur	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X		X
Architecture racinaire	X	X	X	X	X			X	X	X			X	X	X
Maintien de la qualité des produits	X		X	X	X	X	X			X	X	X		X	
Modification de la composition des récoltes (sucres, protéines...)	X	X		X	X		X	X	X	X			X		X
Tolérance à la sécheresse	X		X	X	X		X	X	X	X			X		X
Efficacité de l'utilisation de l'eau	X		X	X	X		X		X	X				X	X
Vigueur au stade précoce	X	X	X		X		X	X		X			X	X	
Floraison précoce	X		X	X	X			X	X	X			X		
Résistance au gel	X				X			X	X			X	X	X	X
Aptitude au semis précoce	X		X		X	X	X	X					X		
Absorption minérale (N, P, K)	X				X		X	X	X	X					
Capacité à rester vert		X			X		X	X	X	X					
Aptitude au semis tardif	X				X			X					X	X	
Besoins en °C/J			X	X	X	X			X						
Maturité tardive				X		X		X				X	X		
Résistance au gel tardif				X	X							X	X	X	
Floraison tardive				X				X		X			X		
Microbiome racinaire	X	X			X				X						
Sensibilité à la photopériode	X	X					X						X		
Interception de la lumière			X		X		X								
Nature / qualité des fibres			X							X	X				
Aptitude à la culture en mélange														X	X
Résistance à la montaison							X							X	
Richesse fibre										X	X				
Amélioration du stockage et de la remobilisation du glucose										X					
Capacité à germer / à lever en conditions très sèches								X							
Pb feuilles et des grains verts à la récolte						X									
Résistance à la stagnation en eau	X														
Résistance aux oiseaux										X					
Taille des graines										X					

**Tableau 3** : Tableaux de réponses des différentes sections du CTPS (pour lesquelles il n'existe pas d'épreuve VATE) à la question : « Dans le contexte du changement climatique, quelles sont selon vous les anticipations qu'il faut prévoir dès à présent en termes de traits de sélection ? Indiquez si le trait est déjà sous sélection ou devrait l'être »

Traits	Fraises	Pommiers à cidre	Fruits (hors petits)	Espèces légumières	POPAM
Maintien de la qualité des produits	X	X	X	X	X
Résistance aux maladies	X	X	X	X	X
Résistances aux ravageurs	X	X	X		X
Maturité précoce	X		X	X	
Maturité tardive		X	X	X	
Floraison tardive	X	X			X
Floraison précoce	X		X	X	X
Modification de la composition des récoltes (sucres, protéines ... à préciser)	X	X	X	X	
Besoins en °C/J	X	X		X	
Microbiome racinaire			X	X	X
Tolérance à la chaleur	X	X	X	X	X
Tolérance à la sécheresse	X	X	X		X
Amélioration du potentiel de rendement	X		X		
Vigueur au stade précoce			X	X	
Adaptation aux nuits tropicales				X	
Sensibilité à la photopériode	X				
Efficacité de l'utilisation de l'eau	X	X	X	X	X
Architecture racinaire		X	X		X
Absorption minérale (N, P, K)		X		X	
Résistance au gel		X	X		
Amélioration du stockage et de la remobilisation du glucose		X			
Aptitude à la culture en mélange				X	
Capacité à rester vert					X
Résistance à la stagnation en eau		X			
Résistance au gel tardif			X		

Le CS du CTPS souhaite préciser que le fait qu'un trait soit déclaré comme « déjà sous sélection » ne reflète ni le niveau d'avancement opérationnel de la sélection, ni le niveau de difficulté qui peut être rencontré pour parvenir à l'intégrer dans de nouvelles variétés, ni le caractère prioritaire (ou non) au regard du changement climatique. Par ailleurs, il est à rappeler que les variétés et les pratiques culturales vont évoluer en parallèle, ce qui impactera forcément certaines orientations de la sélection.

## 2. Besoins identifiés dans la littérature

### a. Les défis de la sélection pour faire face au changement climatique

Les sélectionneurs doivent s'assurer que les nouvelles variétés présentent une adaptation suffisante pour justifier les investissements des programmes de recherche<sup>[B46]</sup>, car il faut notamment que la performance d'une nouvelle variété, relativement au témoin, soit *a minima* équivalente pour pouvoir être inscrite au catalogue français des plantes cultivées. Or, les **interactions Géotypes – Environnement (GxE)** complexifient le travail de sélection, car les géotypes répondent différemment et avec des intensités variables aux conditions environnementales<sup>[B27]</sup>. Il leur faut donc trouver un équilibre entre adaptation à une situation particulière et stabilité des rendements<sup>[B46]</sup>. Dans l'idéal, le classement entre variétés devrait rester constant entre les différents environnements pour identifier

les meilleures variétés. Or, dans de nombreux cas, les interactions GxE inversent des classements variétaux sur des environnements contrastés. Le succès de l'agriculture conventionnelle a été de réduire les variations environnementales et les stress, diminuant ainsi le GxE et facilitant la sélection. Dans des conduites agroécologiques, afin de réduire ou mieux intégrer les interactions GxE, il existe alors plusieurs stratégies potentielles en sélection :

- Sélectionner spécifiquement pour un type d'environnement<sup>[B27]</sup>
- Sélectionner des géotypes stables qui interagissent peu avec leur environnement<sup>[B27]</sup>
- Assembler des géotypes pour permettre une meilleure stabilité dans un ensemble d'environnements.

De plus, la sélection pour des variétés résilientes au climat est rendue compliquée car la plupart des traits d'intérêt sont polygéniques<sup>[B27]</sup>.

La sélection conventionnelle, basée sur l'évaluation dans des environnements variés pendant plusieurs années, a prouvé son efficacité pour une adaptation progressive des variétés modernes au changement des conditions de culture. Jusqu'à présent, l'adaptation au changement climatique a surtout été le co-produit d'une sélection basée sur le rendement et sur sa stabilité, encouragée par les politiques d'inscription<sup>[B40]</sup>. Le processus d'évaluation en sélection conventionnelle (tests des géotypes en multi-environnements pendant plusieurs années) est adapté à un changement climatique graduel. Or, avec l'accélération du changement climatique, l'exception va devenir la norme et il y a un réel besoin d'accélérer le processus de sélection. Il faut donc optimiser le processus d'évaluation pour appréhender la variabilité génétique d'intérêt qui va grandement affecter l'adaptation long-terme aux stress, sans introduire d'effets pléiotropes<sup>[B40]</sup>.

Il est essentiel de caractériser les différents profils de stress que les espèces peuvent être amenées à subir, en termes de phase de développement phénologique notamment, pour déterminer les phases clés sur lesquelles la sélection doit travailler. Conduire des essais sur des géotypes adaptés à la sécheresse ou aux températures hautes sous différents profils de stress (via des essais multisites) peut permettre de déterminer quels sont les traits les plus sensibles aux interactions GxE et quels sont les marqueurs moléculaires qui y sont associés. Par exemple, en utilisant le réseau IWIN (*International Wheat Improvement Network*), il serait possible de mener la plus grande évaluation en date concernant la date d'épiaison et les gènes d'induction de la floraison du blé (*Ppd*, *Vrn* et *Eps*), qui sous-tendent la biologie de la reproduction et la détermination du rendement sous différents profils de chaleur et de sécheresse<sup>[B46]</sup>. Une autre approche peut, à l'inverse, reposer sur l'évaluation de géotypes présentant une variabilité sur la tolérance aux stress d'intérêt (des plus ou moins tolérantes) pour identifier les traits et les marqueurs d'intérêt.

#### b. Stratégies d'adaptation

Dans le cadre du Varenne agricole de l'eau et de l'adaptation au changement climatique, une réflexion a eu lieu quant à la place de la génétique dans la réponse de l'agriculture au changement climatique. Il est mis en avant que chercher de nouvelles variétés adaptées aux futures conditions climatiques, notamment en termes de contraintes thermiques et hydriques, repose sur le paradoxe d'optimiser des caractères d'adaptation tels que la fermeture stomatique pour résister à la sécheresse, ce qui limite la transpiration et donc la photosynthèse, sans pour autant trop impacter la croissance et la production de biomasse<sup>[B47]</sup>. Il est donc nécessaire d'adapter l'approche du sélectionneur pour prendre en compte les éventuelles covariations phénotypiques (interdépendances de deux traits ou plus) lors de la sélection ciblée de nouvelles caractéristiques<sup>[B30]</sup>.

Le Varenne agricole de l'eau et de l'adaptation au changement climatique identifie 4 stratégies pour la sélection en réponse au changement climatique<sup>[B47]</sup> :

- **Résister aux stress** (survivre et récupérer), stratégie des plantes des lieux arides, qui repose sur l'existence de gènes de résistance

- **Echapper aux stress** (cultiver au bon moment), à travers notamment un raccourcissement du cycle de croissance, ce qui implique d'organiser et d'étendre la variabilité de la durée du cycle des variétés pour offrir un catalogue large aux agriculteurs
- **Eviter les stress** (économiser de l'eau) en améliorant l'efficacité de l'utilisation de l'eau (réduction de la transpiration nocturne par exemple)
- **Produire malgré les stress** (obtenir le meilleur rendement possible)

Ces stratégies ne sont pas exclusives les unes des autres et peuvent mobiliser une adaptation de pratiques agronomiques : par exemple, l'agroforesterie, qui limite les températures extrêmes à l'échelle du couvert (donc évite ou échappe au stress) pose des questions sur la tolérance à l'ombrage ou le calage des cycles des espèces associées...

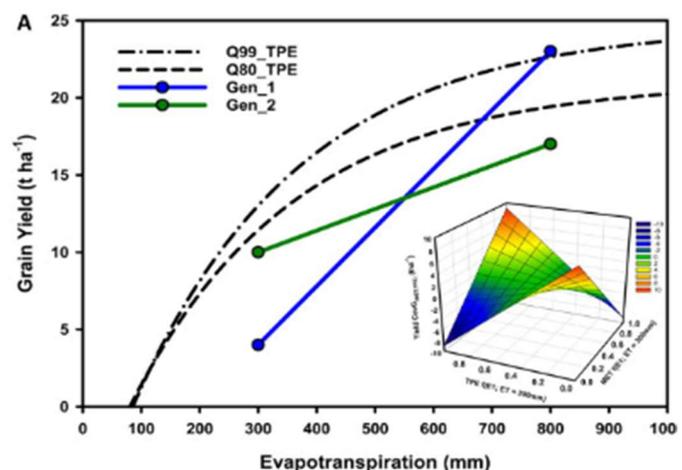
Jusqu'à présent, la sélection s'est majoritairement faite à travers le critère de « rendement », ainsi que dans une certaine mesure sur les traits associés à la tolérance aux stress biotiques et abiotiques [B30, B40]. Dans le cadre du changement climatique, plusieurs stress sont susceptibles de se produire, et la sélection a jusqu'à présent réalisé un travail principalement sur le stress abiotique de la sécheresse [B40].

### c. S'adapter à la sécheresse et aux fortes températures

Dans leur étude, Snowdon et al. ont constaté une augmentation du nombre d'articles et de publications sur la question de « la sélection », de « l'évaluation » ou de « la génétique » en relation avec le « changement climatique » ou « la sécheresse », notamment depuis 2015 [B40, B48].

En s'inspirant d'une étude sur le lien entre évapotranspiration et rendement, de Van Ittersum et al., Cooper et Messina suggèrent qu'une cible pour le travail de sélection pour la tolérance à la sécheresse pourrait être d'atteindre un rendement, pour des cultures qui subiraient un ou des épisodes de sécheresse, de 80% du rendement potentiel en conditions bien irriguées [B48]. Cette analyse illustre les trade-off possibles entre tolérance à la sécheresse et rendement maximal, et la possible perte de rendement associée (dans un premier temps) à la sélection pour une meilleure tolérance au stress. Pour identifier des variétés adaptées à la sécheresse, il est possible de définir la norme de réaction, qui décrit les variations phénotypiques d'un seul génotype dans une gamme d'environnements, afin d'étudier l'interaction GxE (voir Figure 39). Un prérequis à l'étude de la tolérance à la sécheresse est la capacité à caractériser la quantité et la période de disponibilité en eau (et donc de non-disponibilité) tout au long du cycle.

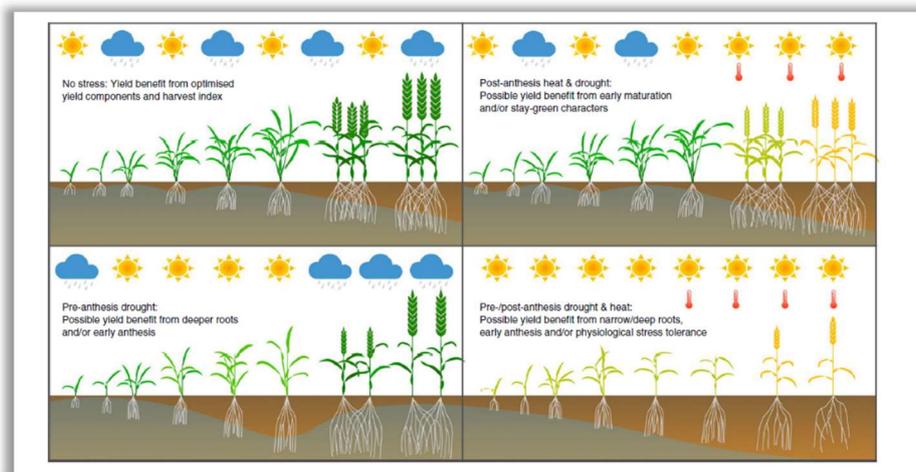
Le progrès effectué sur la tolérance à la sécheresse n'est que graduel dans la majorité des cultures, car si l'on peut identifier des gènes majeurs responsables de la tolérance à la sécheresse, le gain d'un mécanisme physiologique conféré par un gène (ou un réseau de gènes) est fonction du scénario de sécheresse, qui varie selon les années et les lieux [B40]. Néanmoins, la bonne connaissance de ces réponses aux



**Figure 39** : Représentation schématique de l'interaction GxE et norme de réaction contrastée pour le rendement en grain de 2 génotypes de maïs hybrides sous des niveaux de sécheresse différents, représentés par un continuum d'évapotranspiration (Gen\_1 : haut potentiel de rendement et sensible à la sécheresse ; Gen\_2 : faible potentiel de rendement et tolérant à la sécheresse) – Source : B48

stress permet de décrire et mieux exploiter les variétés en les déployant dans les environnements où elles sont les plus adaptées. Ceci pose la question de la prédictibilité des stress, plus complexe pour les stress hydriques thermiques que pour d'autres stress très prédictibles (par exemple, la tolérance à la salinité pour le riz).

En réalité, les réponses physiologiques des cultures au phénomène de sécheresse varient grandement en fonction du moment où elle se produit, de sa durée et de sa sévérité (voir [Figure 40](#)). Ces réponses physiologiques ne sont pas gouvernées par des gènes facilement identifiables, mais sont le résultat de régulations génétiques complexes fortement dépendants de l'environnement, faiblement héritables et aux interactions pléiotropes, surtout si les épisodes de sécheresse ont lieu au moment de la floraison ou lors du remplissage des grains. De ce fait, la « résistance à la sécheresse » n'est pas un objectif de sélection en tant que tel, à moins qu'elle ne soit associée à une forte performance de rendement à la fois en conditions optimales et en conditions stressées<sup>[B40]</sup>.



**Figure 40** : Illustration de l'effet variable de la sécheresse sur les performances d'une culture selon le moment et la durée des épisodes de sécheresse – [Source : B40](#)

Plusieurs traits déjà sous sélection peuvent être cités : de plus longs coléoptiles en blé permettent une implantation plus précoce (stratégie d'échappement) et une meilleure utilisation de l'eau stockée dans le sol (stratégie d'évitement) ; la sélection de plantes avec de petits profils de feuilles permet de conserver plus d'eau ; des racines à angles raides permettent un meilleur accès à l'eau dans les couches profondes du sol...

L'approche la plus prometteuse pour la tolérance à la sécheresse chez les céréales (blé, sorgho) semble être la capacité de la plante à rester verte (stay-green trait), qui permet également de contrer le phénomène de senescence induit par le stress thermique. Ce caractère peut notamment être amélioré par la sélection d'une architecture racinaire qui améliore l'équilibre post-anthèse entre l'offre et la demande en eau pour la croissance de la culture en conditions limitantes en eau<sup>[B40, B49]</sup>.

Plusieurs loci intervenant dans la capacité à rester vert ont été identifiés (gènes PIN et gènes de la réponse à la vernalisation VRN), mais leur association dans un seul génotype entraîne des effets pléiotropes qui peuvent impacter le rendement sous certaines conditions environnementales<sup>[B40]</sup>.

Une autre piste pour la tolérance à la sécheresse repose sur l'augmentation de l'efficacité de la photosynthèse afin d'augmenter la productivité des plantes. Cependant, cela ne pourra être intéressant que si l'on améliore et coordonne à la fois la capacité à absorber l'eau et les nutriments, la transition entre la phase végétative et la phase reproductive, et l'allocation des ressources entre les organes sources et puits<sup>[B40]</sup>.

Dans une revue de 2019, Kumar et al. ont souligné que les rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (Plant-growth promoting rhizobacteria - PGPRs) avaient la capacité d'améliorer la résilience des plantes aux stress biotiques et abiotiques<sup>[B50]</sup>. Par exemple, une étude suggère que des plantes soumises à un stress de sécheresse modifient la composition de leur exsudat racinaire afin d'augmenter l'activité microbienne, et qu'en retour, cela permettrait de créer des conditions favorables à la phase de récupération de la plante, à travers, par exemple, une meilleure disponibilité des nutriments. Les auteurs notent l'intérêt à étudier les effets génotypes / microbiotes afin de déterminer une éventuelle composante génétique dans la résilience à la sécheresse via l'interaction avec le microbiote racinaire<sup>[B51]</sup>.

En blé, un lien a été établi entre la température de la canopée et la masse racinaire sous conditions de sécheresse et de températures élevées<sup>[B46]</sup>, ce qui pourrait permettre la création d'un « index racinaire » servant de proxy pour caractériser la résistance à ces stress abiotiques. Un important travail de phénotypage reste à réaliser pour pouvoir utiliser un tel index racinaire. Des pratiques telles que l'agroforesterie sont également à explorer pour réguler la température de la canopée et permettre une adaptation des cultures au stress thermique.

#### d. Modification de la phénologie

Parmi les sélections opérées pour s'adapter à un climat plus chaud, des variétés plus « précoces » ont été utilisées. Il s'agit de variétés à croissance plus rapide qui permettent d'esquiver les températures les plus fortes. Cette option d'adaptation est déjà adoptée par de nombreux producteurs de céréales. Pour les cultures annuelles récoltées à la fin du printemps ou au début de l'été, cette option peut être efficace si les vagues de chaleur surviennent en fin d'été. L'efficacité de cette option diminuera donc avec la précocité et l'allongement des périodes de vagues de chaleur. Et cette option accroît les risques de gelées à des stades sensibles tels que la floraison pour certaines espèces. Pour les cultures récoltées à la fin de l'été ou en automne, cette stratégie semble moins adaptée car elle augmente la probabilité de rencontre de vagues de chaleur pendant des stades critiques de la culture<sup>[B5]</sup>.

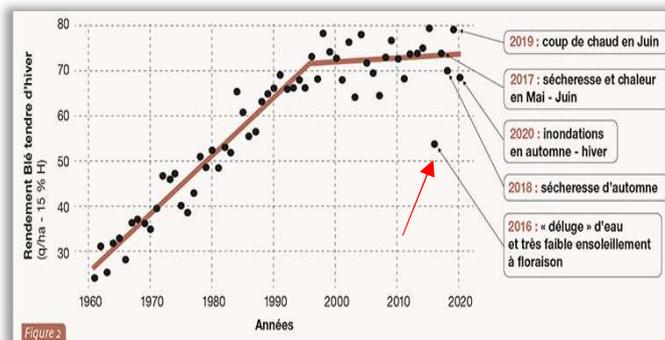
Les arbres fruitiers sont également des cultures pour lesquelles les modifications de phénologie vont être importantes : ainsi, pour Guillaume Charrier, écophysiologiste à INRAE de Clermont-Ferrand, implanter des variétés d'abricot et de pomme ayant moins de besoins de froid peut d'ores et déjà être une « piste » pour le sud de la France, notamment en Languedoc-Roussillon. « Sur la dernière décennie, on observe de plus en plus d'hivers doux où les besoins en froid sont à la limite d'être satisfaits. Ça risque d'être de plus en plus fréquent »<sup>[S18]</sup>. Qu'il s'agisse d'une variété existante ou d'une variété nouvelle, elle doit répondre à deux compromis, résume Guillaume Charrier. « Il faut trouver des variétés qui ont des besoins de froids relativement faibles, pour que la levée de dormance se déroule dans de bonnes conditions ; mais qui ont des besoins de chaleur relativement importants, pour ne pas débourrer et fleurir trop tôt au moment des gelées tardives », explique-t-il.

« Il y a aussi un compromis à trouver entre risque de gelées tardives et stress hydriques, lesquels vont devenir plus récurrents. C'est-à-dire que tout en échappant au risque de gel, il faut que la plante débourre suffisamment tôt pour commencer son cycle de formation des fruits avant d'être dans la période estivale où la ressource en eau est limitée »<sup>[S18]</sup>.

### e. Un caractère sous-estimé : l'excès d'eau et sa stagnation

Le CS tient à souligner le déphasage qu'il existe entre le peu de recherches effectuées sur les effets de l'excès d'eau sur les cultures et la réalité économique de cet événement climatique extrême (voir [Figure 41](#)). En effet, les mauvaises années agricoles sont souvent liées à ce phénomène, associé à la problématique du manque de luminosité<sup>[B52]</sup>, et qui s'accompagne souvent d'une forte pression de maladies, mais ce sujet reste relativement peu étudié.

L'année 2024, marquée par de forts épisodes d'excès d'eau, est représentative de ce phénomène, avec un rendement en blé tendre qui atteint en moyenne 62,4 q/ha au niveau national, contre 73,8 q/ha en 2023<sup>[S20]</sup>.



**Figure 41** : Evolution du rendement du blé tendre d'hiver en France entre 1960 et 2020, et principaux événements climatiques extrêmes depuis 10 ans (la flèche rouge indique l'année 2016, marquée par les excès d'eau) – Source : S19

### 3. Éléments génériques à extraire pour préciser les cibles de sélection

Le CS du CTPS propose de regrouper les différents traits de sélection en cinq catégories :

- L'amélioration du potentiel de rendement (hors résistances aux stress)
- Les résistances aux stress biotiques (résistances aux maladies, contrôle des adventices, résistances aux ravageurs, résistances aux oiseaux)
- Les résistances aux stress abiotiques et l'utilisation des nutriments (tolérance à la sécheresse, tolérance à la chaleur, efficacité de l'utilisation de l'eau, architecture racinaire, semis en conditions sèches, absorption minérale, microbiome racinaire, résistance à la stagnation en eau)
- La modification de la phénologie (besoin en °C/J, sensibilité à la photopériode, aptitude au semis précoce, aptitude au semis tardif, floraison précoce, floraison tardive, maturité précoce, maturité tardive, problématique des grains verts à la récolte, résistance à la montaison, résistance au gel, vigueur au stade précoce)
- Le maintien de la qualité des produit (amélioration du stockage et de la remobilisation du glucose, modification de la composition des récoltes, richesse en fibres, qualité des fibres)

Pour chacune des espèces (ou groupe d'espèces) des sections, le CS du CTPS a cherché à estimer, à dire d'experts, les priorités de sélection actuelles et positionner les priorités futures en regard du changement climatique et des enjeux associés (voir [Tableau 4](#)). Cela permet de mesurer l'importance du déplacement à parcourir pour pouvoir proposer des variétés adaptées aux enjeux climatiques.

**Tableau 4** : Estimation des priorités de sélection actuelles (en haut) et des priorités idéales dans le futur (en bas) pour les différentes espèces, notée de 1 à 5 (du plus prioritaire au moins prioritaire).

Priorités ACTUELLES					
Espèces	Améliorer le potentiel de rendement	Stabiliser le rendement par l'amélioration de la résistance aux stress biotiques	Stabiliser le rendement par l'amélioration de la résistance aux stress abiotiques et une meilleure utilisation des nutriments	Stabiliser le rendement par la modification de la phénologie	Stabiliser la qualité des produits
Arbres forestiers	5	1	2	3	4
Betterave sucrière	1	3	2		4
Céréales à Paille	1	2	5	4	3
Chanvre			1		2
Plantes de services	3	4	1	2	
Colza	1	3	4	5	2
Espèces fruitières	5	3	2	1	4
Espèces légumières	2	1	5	4	3
Lin fibre	1	3	4	5	2
Lin oléagineux	1	3	4	5	2
Maïs	1	5	2	3	4
Plantes fourragères	1	2	4	5	3
Pomme de Terre	1	2	4		3
POPAM		1	3	4	2
Protéagineux	1	2	3	5	4
Soja	1	5	3	2	4
Sorgho	1	5	3	4	2
Tournesol	1	3	5	4	2
Vigne	5	1	4	2	3

Priorités idéales DANS LE FUTUR					
Espèces	Améliorer le potentiel de rendement	Stabiliser le rendement par l'amélioration de la résistance aux stress biotiques	Stabiliser le rendement par l'amélioration de la résistance aux stress abiotiques et une meilleure utilisation des nutriments	Stabiliser le rendement par la modification de la phénologie	Stabiliser la qualité des produits
Arbres forestiers	5	2	1	3	4
Betterave sucrière	2	3	1	4	5
Céréales à Paille	5	2	1	4	3
Chanvre			1		2
Plantes de services	2	4	3	1	5
Colza	5	1	2	4	3
Espèces fruitières	5	2	1	4	3
Espèces légumières	2	1	4	5	3
Lin fibre	5	2	3	1	4
Lin oléagineux	5	1	2	4	3
Maïs	2	5	1	3	4
Plantes fourragères	5	4	1	3	2
Pomme de Terre	3	2	1	5	4
POPAM		3	1	4	2
Protéagineux	3	1	2	4	5
Soja	2	5	3	1	4
Sorgho	2	4	1	3	5
Tournesol	4	2	1	5	3
Vigne	5	3	1	4	2

La majorité des espèces est travaillée actuellement avec comme priorité principale d'améliorer le potentiel de rendement, à l'exception des espèces pérennes pour lesquelles l'accent est mis davantage sur la stabilisation du rendement par l'amélioration de la résistance aux stress biotiques (arbres forestiers et vigne) ou par la modification de la phénologie (arbres fruitiers). Le chanvre et les plantes de services font figure d'exception, avec une priorité mise sur la stabilisation du rendement par l'amélioration de la résistance aux stress abiotiques et par une meilleure utilisation des nutriments.

Pour répondre aux enjeux du changement climatique, il faudrait opérer un basculement des priorités pour un grand nombre d'espèces, passant de l'amélioration du potentiel de rendement à une stabilisation du rendement par l'amélioration de la résistance aux stress abiotiques et à une meilleure utilisation des nutriments. La résistance aux stress biotiques devient également un enjeu important pour de nombreuses espèces. Pour le lin fibre, le soja et les plantes de services, il faudrait réorienter les priorités de sélection autour des questions de phénologie pour garantir une adéquation avec les évolutions climatiques attendues.

Ce changement de priorités dans les cibles de sélection se fera d'autant plus « facilement » que l'écart avec les priorités actuelles est faible, et que le niveau de maturité des connaissances autour de ces thématiques est avancé. Pour cela, le CS du CTPS propose, dans le Tableau 5 ci-dessous, une évaluation de l'état des connaissances pour chacune des espèces :

**Tableau 5** : Estimation de l'état des connaissances relatives à chaque cible de sélection, pour l'ensemble des espèces.  
NSP : Ne se Prononce Pas ; 0 : pas de connaissance ; 1 : recherche académique ; 2 : recherche avec les professionnels ; 3 : en routine, voire en évaluation dans les travaux de sélection

Espèce	Etat des connaissances sur :				
	Améliorer le potentiel de rendement	Stabiliser le rendement par l'amélioration de la résistance aux stress biotiques	Stabiliser le rendement par l'amélioration de la résistance aux stress abiotiques et une meilleure utilisation des nutriments	Stabiliser le rendement par la modification de la phénologie	Stabiliser la qualité des produits
Arbres forestiers	2	2	1	2	2
Betterave sucrière	3	3	2	0	3
Céréales à Paille	3	3	2	3	2
Chanvre	0	0	3	NSP	3
Plantes de services	2	2	1	2	
Colza	3	2	1	3	1
Espèces fruitières	0	3	1	3	3
Espèces légumières	2	3	2	NSP	3
Lin fibre	3	2	2	1	3
Lin oléagineux	NSP	2	2	3	1
Maïs	3	2	3	3	2
Plantes fourragères	3	2	3	3	2
Pomme de Terre	3	3	2	0	3
POPAM	0	3	2	NSP	3
Protéagineux	3	2	1	1	2
Soja	3	1	2	3	2
Sorgho	3	2	3	3	2
Tournesol	3	3	2	3	3
Vigne	0	3	2	3	3

L'un des défis identifiés par le CS du CTPS concerne la possibilité de concilier différents objectifs de sélection entre eux et d'identifier ceux pour lesquels ce compromis est plus difficile que d'autres, du fait des corrélations entre les traits qui sous-tendent ces objectifs. L'absence de compromis possible demande alors de développer des programmes de sélection distincts.

Par ailleurs, certains traits n'ont de sens que si les pratiques évoluent en parallèle, comme l'aptitude à la culture en mélange, qui présente l'intérêt de répartir les risques encourus par la culture sur plusieurs variétés ou espèces, les faiblesses des unes vis-à-vis d'un stress étant compensées par les qualités d'adaptation des autres.

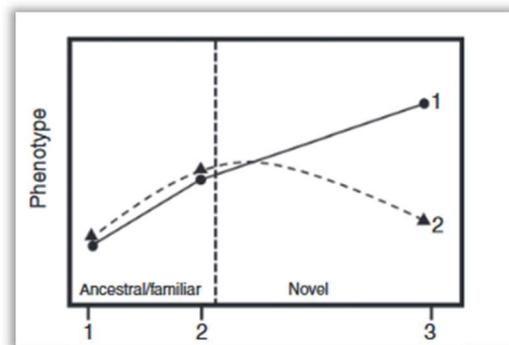
De plus, il semble pertinent de mentionner les différentes formes de variétés pour la sélection dans un contexte de changement climatique. Plusieurs publications comparent variétés lignées pures, hybrides, populations, variétés synthétiques et concluent sur l'intérêt de chaque type en fonction de plusieurs paramètres génétiques (variabilité génétique, dépression de consanguinité), mais aussi économique (coût de la sélection et de la semence) et environnementaux (variabilité contrôlée et non contrôlée). Ainsi, si les lignées et hybrides présentent des potentiels de gains plus importants, les populations ou variétés synthétiques peuvent présenter un intérêt pour des environnements hétérogènes<sup>[B53]</sup>, tout cela dépendant largement de la biologie reproductrice des espèces qui influe elle-même fortement sur la faisabilité et la performance de ces différents schémas de sélection. Les évolutions récentes de la réglementation française sur la commercialisation de mélanges de variétés, variétés populations, voire même Matériel Hétérogène Biologique appuient cette évolution possible des types variétaux.

#### F. La place des Ressources PhytoGénétiques dans l'adaptation au changement climatique

Selon la FAO, les Ressources Génétiques pour l'Alimentation et l'Agriculture (RGAA) sont essentielles à l'agriculture durable et à la sécurité alimentaire. Il est indispensable de mieux caractériser les ressources génétiques pour élaborer des stratégies solides en matière d'atténuation du changement climatique et d'adaptation à ses effets. De nombreuses RGAA sont conservées dans des banques de gènes (ex situ) tandis que d'autres doivent être conservées dans des systèmes de production agricole ou dans des habitats naturels ou semi-naturel (in situ). Il est cependant recommandé d'adopter une approche combinée prévoyant des mesures complémentaires de conservation in situ et ex situ<sup>[B1]</sup>.

L'analyse des ressources phytogénétiques (RPG) peut être réfléchiée en regard de la notion de « plasticité cryptique » (voir Figure 42), c'est-à-dire une plasticité cachée qui n'était pas visible dans des environnements anciens ou actuels mais qui pourrait s'exprimer dans le cadre d'un changement de l'environnement<sup>[B29]</sup>,

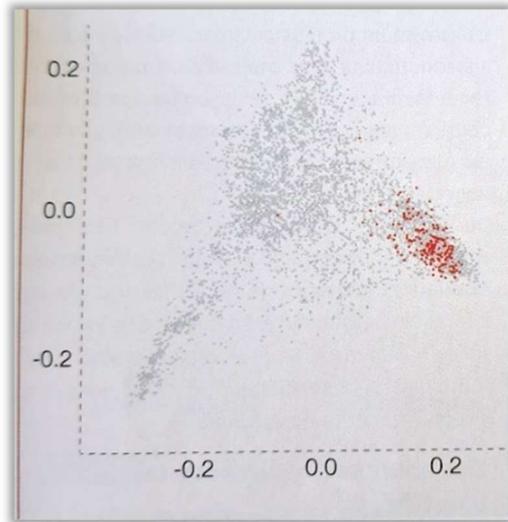
comme c'est le cas avec le changement climatique. Le choix des environnements d'évaluation est donc important pour ne pas « passer à côté » d'un trait plastique aux valeurs intéressantes.



**Figure 42** : Illustration du concept de « plasticité cryptique », qui se révèle dans le cas d'une exposition à un nouvel environnement – Source : B29

Par exemple, pour le blé, on estime que les réserves génétiques sont relativement peu exploitées, et comporteraient près de 800 000 accessions réparties dans plus de 80 collections à travers le monde (voir [Figure 43](#)). La majorité de ces ressources génétiques n'a jamais été évaluée au regard de la résilience au changement climatique<sup>[B46]</sup>. Par exemple, une étude de Morgounov *et al.* suggère que plusieurs accessions sauvages de blé en Afghanistan, Iran et Turquie pourraient être adaptées à un climat sec et à des conditions de températures élevées ; les réponses plastiques de ces accessions à la sécheresse et aux températures élevées pourraient se révéler d'intérêt pour les futurs programmes de sélection, car les variétés modernes, qui n'ont pas été évaluées ni sélectionnées en regard de ces conditions, n'auraient pas conservé cette plasticité initiale<sup>[B54]</sup>.

Etant donné le nombre d'accessions, il est recommandé de procéder par regroupement d'accessions de bases (*core sets*) pour maximiser la diversité génétique à tester<sup>[B46]</sup>.



**Figure 43** : Composantes de la diversité génétique en blé. En rouge, les variétés élitaires françaises ; en gris, les variétés mondiales – Source R1

Une autre source critique d'information est l'origine de ces ressources, qui permet d'associer une « landrace » à un contexte pédoclimatique précis. Ces informations sont également essentielles pour développer différentes analyses génétiques. Ainsi des travaux récents montrent qu'il est possible de caractériser les adaptations génétiques à des environnements par des prédictions génomiques (Genomic offset). Les programmes de génotypage des collections sont donc une autre approche importante pour détecter des adaptations originales<sup>[B55]</sup>.

La caractérisation de matériel génétique sauvage et non adapté peut se révéler compliquée : par exemple, il peut exister des différences de phénologies avec les références adaptées aux caractéristiques locales, rendant problématique le choix du moment d'application de stress et les comparaisons directes. Il faut également prendre en considération que certains traits d'adaptation à un stress pourraient négativement impacter le rendement en conditions favorables<sup>[B46]</sup>. Par ailleurs, la méthode la plus appropriée pour quantifier une réponse plastique dépend du trait considéré, de l'espèce étudiée, du nombre d'environnement testés et de la question de recherche sous-jacente<sup>[B29]</sup>.

La section « Ressources phytogénétiques » du CTPS a listé, en réponse au questionnaire envoyé par le CS du CTPS, un certain nombre de traits d'intérêt qui lui semblerait utiles de caractériser au sein des collections :

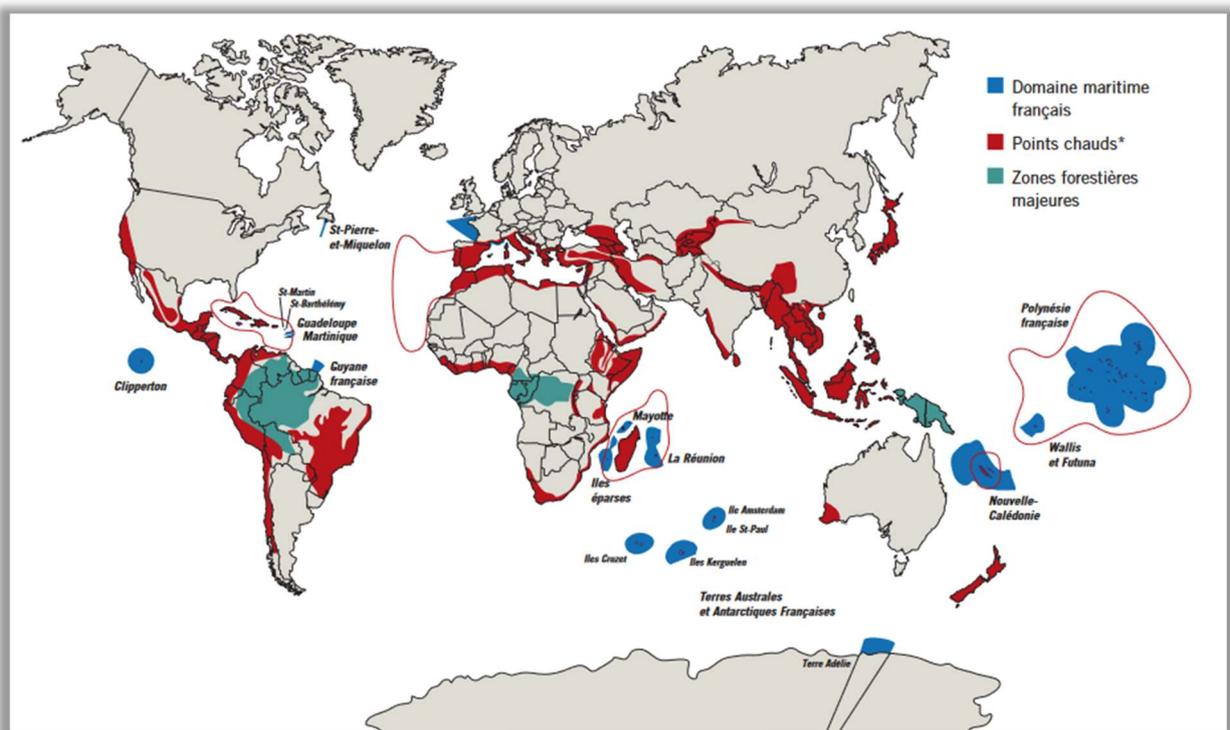
- Tolérance à la sécheresse et aux températures élevées dans les phases critiques (germination, pollinisation, nouaison ...)
- Tolérance du pollen aux températures hautes
- Caractérisation stomatique pour augmenter ou limiter l'évapotranspiration
- Levée de dormance précoce au printemps
- Besoins de cumuls de températures
- Attractivité vis-à-vis des auxiliaires
- Capacité de fructification sans insecte

Les territoires ultramarins constituent une ressource très importante en termes de biodiversité, à l'image par exemple des jardins créoles, qui sont un type d'agroécosystème fréquent en Guyane, aux Antilles et à La Réunion, destinés à la production de fruits et légumes et caractérisés par l'association d'une grande diversité d'espèces de plantes différentes, formant plusieurs strates de végétation<sup>[B56]</sup>.

Les territoires d’Outre-mer concentrent 80% de la biodiversité nationale (Figure 44), et étant donné le caractère insulaire de la plupart de ces zones, présentent un très haut niveau d’endémisme. Ainsi, 96% des plantes vasculaires spécifiques à la France sont concentrées sur les 22% de son territoire que représentent les Outre-mer<sup>[S21]</sup>.

Les RPG sont elles-mêmes menacées par le changement climatique, comme l’ont souligné certains répondants à travers le questionnaire qui leur a été adressé par le CS du CTPS.

Pour certaines espèces dont les ressources sont conservées *in situ*, les risques peuvent être importants. Ainsi, on peut mentionner le transfert de la collection vigne, qui a été déplacée de Marseillan-Plage vers Carcassonne : en effet, la collection était située en bord de mer et se trouvait menacée par la montée des eaux et les risques de salinité excessive associée.



**Figure 44** : Carte présentant les 34 points chauds de la biodiversité mondiale et la situation particulière de la France, présente dans cinq de ces zones – Source : B57

Les sections « Espèces fruitières » et « Pomme de terre » soulignent également qu’il existe un risque de perte des vergers conservatoires / des collections :

- Par manque d’eau car souvent ils ne sont pas irrigués (manque de moyens parfois lié au fait que les subventions/appels à projet ne permettent qu’un financement limité dans le temps, non adapté à la gestion d’une structure pérenne)
- En raison de la difficulté à gérer les attaques d’organismes nuisibles, soit parce que les substances actives ne sont plus autorisées, soit parce qu’il s’agit d’organismes émergents. Les accessions conservées sont souvent très sensibles à certaines maladies.

La section « Colza et autres Crucifères » souligne que le colza a de très nombreux parents sauvages qui n’ont pas encore tous été étudiés et qui peuvent devenir importants pour l’introgession de résistances.

Si les parents sauvages disparaissent avant à cause du changement climatique, beaucoup de biodiversité et de possibilités de pool génétique seront perdues.

D'autres sections mettent en avant les risques encourus lors de la multiplication des ressources phylogénétiques, notamment en cas de fortes chaleurs et de sécheresse qui peuvent limiter les rendements.

A court terme, la section « RPG » recommande les points suivants au niveau des collections :

- Caractériser les conditions pédoclimatiques des sites d'implantation des collections
- Structurer une veille épidémiologique au service des collections
- Conserver un double des collections localisé dans un autre lieu (notamment dans les zones à climat plus tempéré) et en diversifiant, lorsque cela est possible, les modes de conservations (in situ, au champ, ex situ, cryoconservation)
- Coupler gestion ex-situ avec une gestion dynamique des collections, en permettant la coévolution des ressources avec le climat. A ce titre, la conservation à la ferme et la sélection participative sont à la fois des moyens de redéployer les ressources génétiques au champ, de permettre la sélection de combinaisons adaptées à des climats et pratiques culturelles locales, d'identifier les gènes impliqués dans ces adaptations, et également de capter de nouvelles mutations [B58, B59].

Il faut ensuite définir une stratégie pour caractériser les accessions en réponse aux différents stress en lien avec le changement climatique, sur toute la durée du cycle de la plante. Enfin, il faut apporter une attention particulière aux espèces apparentées sauvages, en caractérisant les niches écologiques, la phénologie et le mode de reproduction.

A plus long terme, la section « RPG » souligne le besoin de développer la coopération nationale (via notamment la coordination d'actions entre acteurs ou la création de plateformes et de mise en commun des moyens techniques) et internationale (en facilitant par exemple les échanges entre collections européennes, en partageant les données de caractérisation entre pays « analogues climatiques »), et de faire évoluer les obligations et les structures de quarantaine pour introduire de nouvelles RPG sur le territoire national).

## G. Diversification des espèces et des variétés

Au sens strict, le terme « diversification » désigne les processus qui mènent à l'état de « diversité » ; sa définition est relativement large, et il peut faire référence à la diversification des cultures (qui comprend l'augmentation de la diversité des cultures, les cultures en mélange, l'association de cultures, l'agroforesterie...) ou être lié à des pratiques agronomiques (par exemple, modification de la date de semis, rotations...) [B60].

La notion de diversification des cultures est par ailleurs importante, dans le contexte du changement climatique, car elle permet de maintenir la stabilité annuelle nationale de rendements des cultures comestibles, avec une magnitude inversement proportionnelle à l'instabilité liée aux variations de précipitations et de températures (voir Figure 45), comme l'ont démontré D. Renard et D. Tilman [B61].

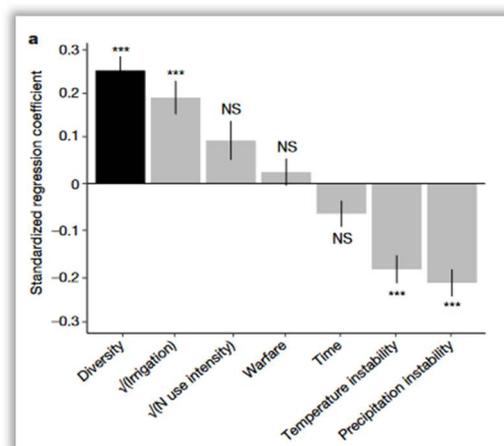


Figure 45 : Déterminants de la stabilité annuelle nationale de rendements des cultures comestibles – Source : B61

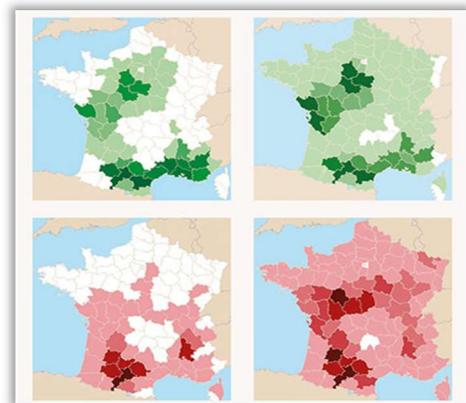
Dans cette saisine, la diversification porte sur l'introduction de nouvelles espèces et le développement d'espèces mineures ou qui peuvent désormais être cultivées ailleurs sur le territoire français. En effet, avec le changement climatique, la production française pourrait être amenée à être modifiée pour s'adapter aux nouvelles conditions de températures et de régimes de précipitations.

Il existe deux méthodes pour identifier de potentielles nouvelles cultures sur un territoire<sup>[B62]</sup> :

- La méthode *ex-ante*, qui se base sur la modélisation des climats futurs, qui sont mis en regard des besoins des plantes. Il faut cependant tenir compte des conditions pédoclimatiques, et non seulement climatiques, pour que la projection puisse être réaliste.
- La méthode *in itinere*, qui consiste à analyser les évolutions déjà en cours à l'échelle d'un territoire. Cette méthode se base sur le présupposé que, le changement climatique étant déjà à l'œuvre, les agriculteurs ont déjà commencé à adopter des changements de cultures.

Le Délégué Interministériel pour le Varenne agricole de l'eau et de l'adaptation au changement climatique (DIVAE) a conduit, en juillet 2023, une réflexion exploratoire en étudiant les potentialités de nouvelles productions ou de migration / relocalisation de productions déjà présentes sur le territoire<sup>[B62]</sup>. Cette étude se base sur la méthode *in itinere* à partir des statistiques agricoles annuelles à l'échelle de la sole agricole française.

Cette étude met en évidence que certaines cultures déjà largement présentes sur le territoire commencent à remonter vers le Nord de la France, notamment le maïs grain (principalement non irrigué), le tournesol et le blé dur (Figure 46).



**Figure 46** : Surfaces cultivées de blé dur (en haut) et de sorgho (en bas) en 1995 (à gauche) et en 2020 (à droite). – Source : S19

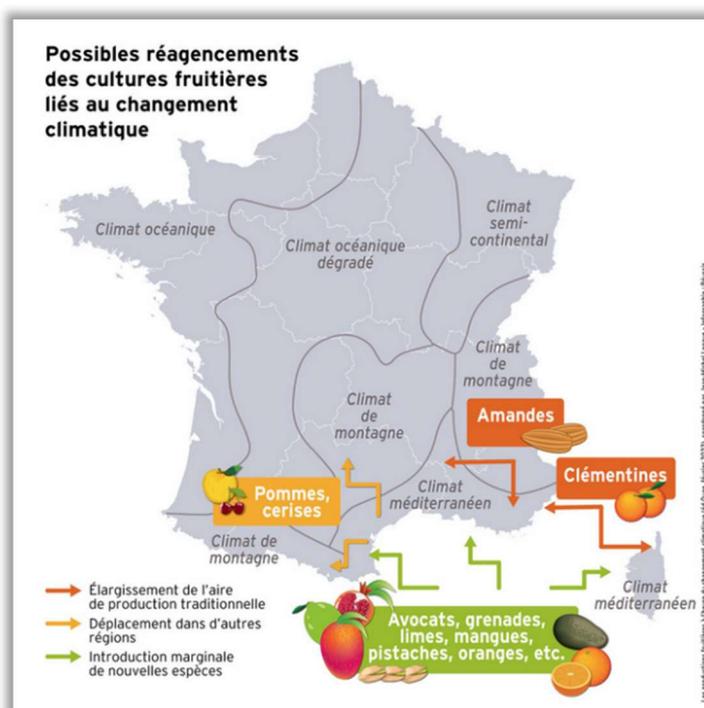
D'autres cultures, moins présentes auparavant, se développent de plus en plus :

- Sur l'ensemble du territoire (sorgho, soja, lentille, sarrasin, quinoa, fève et féverole, mélanges de céréales hors méteil (par exemple, orge-avoine ou blé-avoine), luzerne, prairies multi-espèces)
- Dans les régions Sud (pois secs dont pois chiche, lin oléagineux, pistache)
- Dans les régions Nord (chanvre, lin textile, miscanthus, silphie)

Dans leur étude, Heinz et al.<sup>[B63]</sup> ont utilisé, à l'inverse de la réflexion DIVAE, la méthode *ex-ante* : les chercheurs ont tenté de déterminer, dans le contexte du changement climatique, les cultures alternatives qui pourraient se développer sur le plateau suisse, sans avoir recours à l'irrigation. Pour cela, ils ont utilisé les projections climatiques de températures et de précipitations à horizon 2040 – 2070 et 2070 - 2100 issues des modèles RCP4.5 et RCP 8.5. Ces données climatiques ont été injectées dans le modèle « ecocrop », dont la base de données recense 1710 cultures, définies par plus de 30 paramètres, parmi lesquels les gammes de températures et de pluviométrie, la durée de la saison de culture ou encore les conditions pédologiques les plus favorables. Pour chacune des cultures envisagées, le modèle délivre un indice d'adéquation entre 0 (inadéquat) et 1 (hautement adéquat). Cette approche permet de partir des conditions climatiques attendues et de rechercher les espèces qui pourraient être adaptées dans le futur. Toutes les espèces identifiées (blé dur, quinoa, lentille, lupin blanc et jaune, sésame, amande, noix de Pécan et bourrache) sont relativement robustes face aux conditions climatiques, et certaines sont déjà cultivées à très petite échelle en Suisse. Quatre autres espèces, dont l'indice d'adéquation était élevé, ont été écartées par les auteurs car elles constituaient des plantes invasives ou leur qualité nutritionnelle n'était pas suffisante pour les besoins de l'alimentation.

Concernant la production fruitière, les espèces méridionales migreront potentiellement vers le nord et en altitude, dans la limite de la contrainte gel. La carte ci-contre (Figure 47) présente une idée de ce que pourrait être la redistribution de la production fruitière en France, avec notamment l'introduction marginale de nouvelles espèces venues d'Espagne et d'Italie (avocat, grenade, lime, mangue, pistache, orange).

Cependant, Iñaki García de Cortázar-Atauri, ingénieur de recherche à l'INRAE et directeur du laboratoire Agroclim précise « qu'il n'existe pas de carte précise de la redistribution des bassins de production à 30 ans ». Pour s'adapter, les producteurs comptent puiser dans la génétique mondiale, en implantant notamment des variétés de pomme d'Australie ou du Brésil. En pêche, les variétés cultivées en Floride pourraient être intéressantes [S18].



**Figure 47** : Possibles réagencements des cultures fruitières en lien avec le changement climatique, en France métropolitaine – Source : S18

D'autres espèces sont aujourd'hui en cours de développement sur le territoire national, et pourraient connaître une progression de leur surface étant données leurs caractéristiques permettant de s'adapter aux évolutions du climat :

- Le quinoa est une plante originaire d'Amérique du Sud, et les principaux pays producteurs sont le Pérou et la Bolivie (90% de la production mondiale, sur un total de 230 000 tonnes). La France est le 1<sup>er</sup> producteur de quinoa en Europe (3 000 hectares pour 4000 tonnes en 2023). Le quinoa est une plante tolérante au gel, à la salinité et à la sécheresse, capable de se développer sur des sols relativement pauvres [B27, B64]. Ce n'est pas réellement une céréale (on parle de pseudo-céréale), mais elle est considérée comme telle grâce à ses qualités nutritionnelles et à l'utilisation de ses grains [B65]. En France, l'inscription au catalogue pour le quinoa, considéré une espèce « mineure », n'est pas réglementée [S22]. Un programme de recherche autour de la sélection de variétés de quinoa adaptées aux régions tempérées et aux jours longs est en cours en Allemagne, à l'université de Kiel (*Breeding of quinoa for adaptation to temperate regions*) [S23] et en France, via la société Abbottagra.
- D'autres cultures sont en cours de (re)développement en France, comme :
  - o L'amarante qui s'adapte bien au climat. C'est une plante principalement cultivée en Amérique latine, en Asie et au Kenya. C'est également une pseudo-céréale, comme le quinoa. Elle présente une forte diversité génétique et une importante plasticité phénotypique, ce qui la rend adaptée à des sols pauvres en nutriments. De plus, elle est tolérante à la sécheresse, aux fortes salinités et aux températures élevées [B27, B65].
  - o Le sarrasin (pseudo-céréale) qui est une plante rustique avec un cycle très court de 12 semaines (30 000 hectares en 2023) [B65].
  - o Le tritordeum (nouvelle céréale hybride) [B65].
  - o Le chia, originaire du Mexique (1 000 hectares en 2023) [B65].

- Le millet, qui tolère les épisodes de sécheresse et de fortes températures (20 000 hectares en 2023) <sup>[B27, B65]</sup>.
- La lentille <sup>[S24]</sup>.
- Le kernza, céréale pérenne originaire d’Iran, et qui fait l’objet de recherche à l’ISARA de Lyon <sup>[S25]</sup>.
- La caméline, plante très flexible aux conditions environnementales, connaît un regain d’intérêt <sup>[B27]</sup>.

Les céréales pérennes présentent un intérêt dans le cadre du changement climatique. Elles tolèrent davantage les conditions environnementales défavorables, ont une bonne utilisation de l’eau et des nutriments et participent à la conservation des sols. Leurs traits agronomiques et leur productivité ne sont pas encore entièrement satisfaisants, mais elles ont le potentiel de faire partie du paysage agricole dans le futur <sup>[B65]</sup>.

Les études « *in itinere* » s’appuient sur des constats et des prises de risque déjà engagées, qui peuvent être motivés par bien d’autres facteurs que l’adaptation au changement climatique, notamment les opportunités de marché perçues par les acteurs (quinoa, caméline). Les approches « *ex ante* », elles, négligent tous les autres facteurs qui peuvent peser sur les choix et la pertinence d’une espèce. Surtout, dans les 2 cas, ces approches négligent très fortement la prise en compte du progrès génétique, et en particulier quand elles ciblent des espèces peu sélectionnées, elles négligent largement la faible capacité d’adaptation à venir de l’espèce à l’ensemble des objectifs agronomiques à laquelle une culture doit répondre pour réellement s’installer dans un paysage agricole.

## H. Les défis pour la filière Semences et Plants

La filière française « Semences et Plants » est extrêmement compétitive (1er producteur européen et 1er exportateur mondial <sup>[S26]</sup> de semences), à la fois à travers son contexte pédoclimatique propice aux activités de multiplication, mais aussi grâce aux compétences et connaissances des acteurs de cette filière, et enfin par son contexte réglementaire. A ce titre, il est important de s’interroger sur les impacts que le changement climatique peut entraîner sur cette filière Semences et Plants.

En effet, certains bassins de production vont probablement migrer car les conditions climatiques ne seront plus optimales pour la production de semences de qualité. Certaines sections remontent d’ailleurs des difficultés à fournir la quantité et la qualité de semences nécessaires pour les dépôts d’inscriptions auprès du CTPS (notamment les sections « Céréales à paille » et « Maïs et Sorgho »).

Globalement, le CS du CTPS a estimé (voir [Figure 49](#)) que le risque d’exposition de certaines espèces est relativement faible concernant **l’aspect compétitivité de la filière Semences** pour une grande partie des espèces végétales (maïs, tournesol, céréales à paille, betterave sucrière, pomme de terre, chanvre, POPAM, lin oléagineux, espèces légumières).

La situation semble plus problématique pour le colza (gestion des dates de semis et des ravageurs plus difficile dans les zones de multiplication, problème de synchronie avec les pollinisateurs), les protéagineux (filiale déjà fragile actuellement en raison des aléas sur la production et sur la multiplication) et pour le lin fibre, dont la filière Semences est fortement menacée par la remontée toujours plus au Nord de la zone de multiplication. Certaines espèces fourragères (graminées fourragères et trèfle notamment) sont menacées car moins bien positionnées que d’autres pays concurrents, tandis que d’autres (luzerne par exemple) devrait mieux s’en sortir grâce à un meilleur positionnement géographique que les concurrents directs.

Le sorgho devrait pour sa part bénéficier de la possibilité d'extension des zones de multiplication de semences vers le Nord du pays.

La vigne et les espèces fruitières, dont la multiplication est assurée en pépinière, devraient garder leur avantage compétitif car le recours à la production sous serre permet de s'extraire du risque climatique.

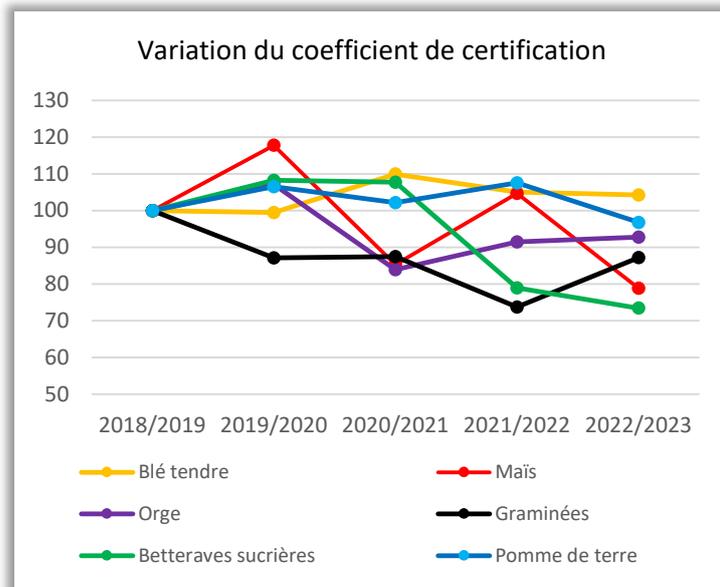
En plus d'impacter le rendement des porte-graines, les aléas climatiques peuvent également dégrader la qualité des récoltes, qu'il s'agisse de la qualité germinative (températures élevées par exemple) ou de la qualité sanitaire (pluviométrie élevée notamment).

Cela se traduit notamment à travers le coefficient de certification pour les semences de grandes cultures (et plants pour les pommes de terre), qui correspond à la quantité certifiable par hectare acceptée au contrôle.

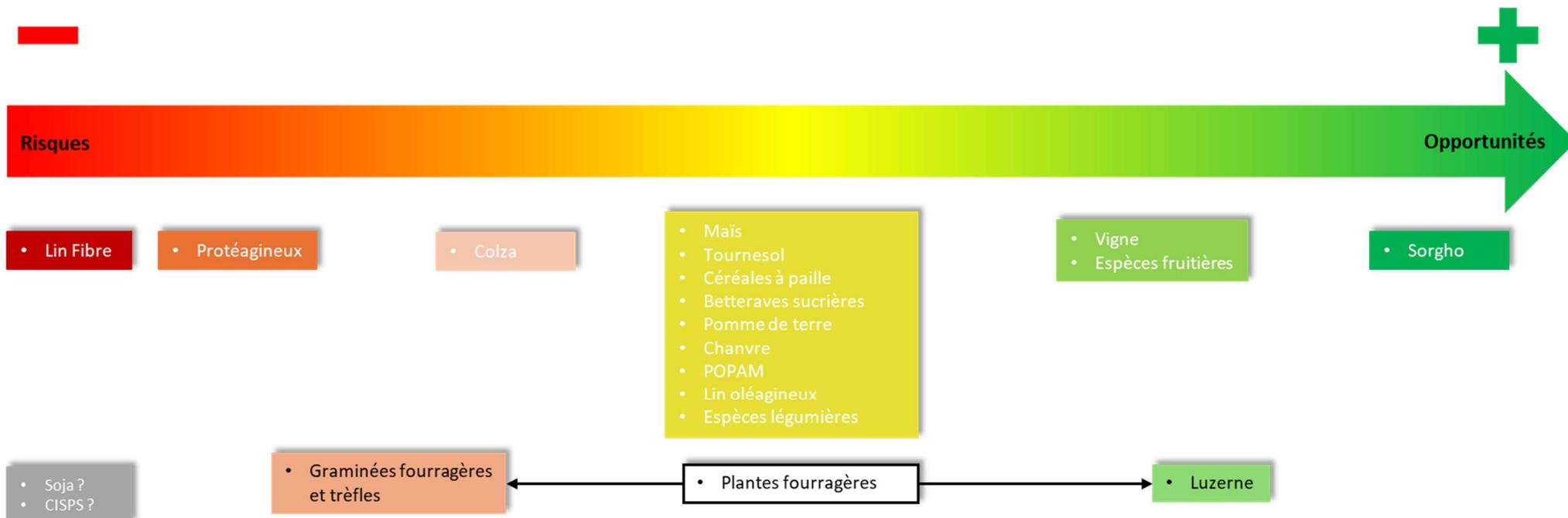
Cette certification est délivrée en fonction de la pureté spécifique du lot de semences, de sa faculté germinative et de sa qualité sanitaire<sup>[S27]</sup>. Les variations des coefficients de certification pour les 5 dernières campagnes sont présentées, pour 6 espèces, dans la Figure 48, à partir des données disponibles auprès de SEMAE, en prenant 2018/2019 comme base 100<sup>[B66]</sup>.

Si le coefficient de certification est stable pour certaines espèces au fil des années (pomme de terre par exemple), il est davantage variable pour le maïs ou les betteraves sucrières, qui ont connu une année de production de semences difficile en 2022/2023.

En maïs, ces résultats en baisse s'expliquent par le manque d'eau dès la levée et les vagues de chaleur, au-delà de 35°C, qui ont notamment impacté la fécondation<sup>[S28]</sup>.

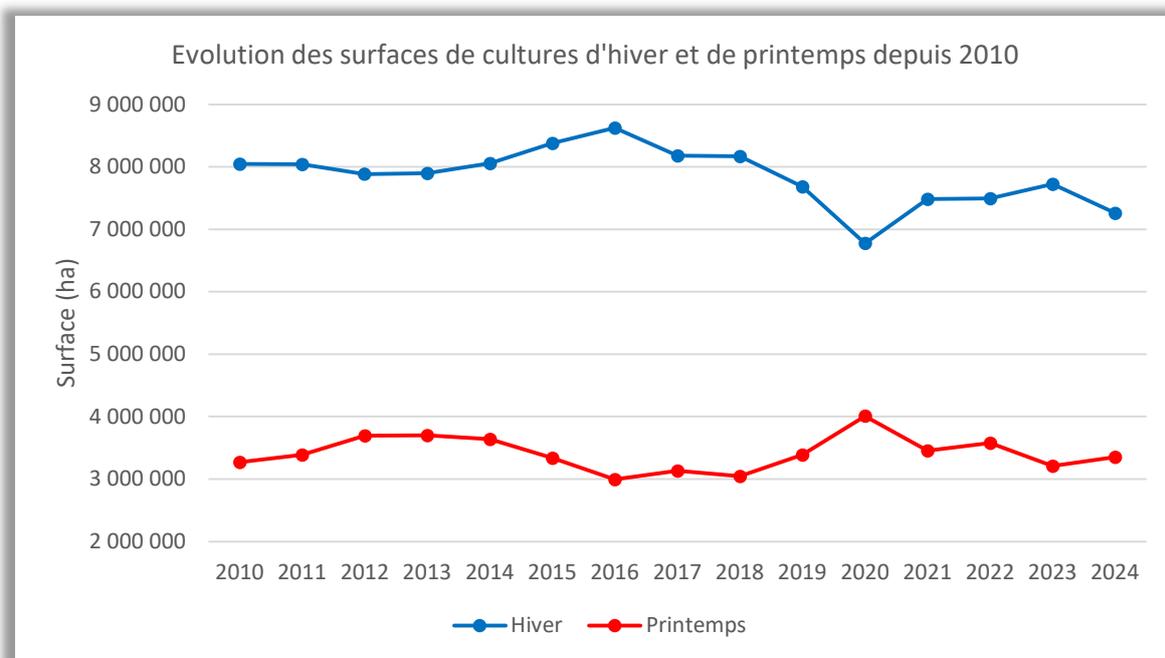


**Figure 48** : Variation du coefficient de certification sur les campagnes de production de semences entre 2018/2019 et 2022/2023 – Source : B66



**Figure 49** : Evolution de l'avantage concurrentiel du territoire français comme zone de production de semences pour les différentes espèces végétales au niveau de la filière « Semences et Plants » face aux risques induits par le changement climatique

De plus, depuis plusieurs années, les problématiques d’implantation des cultures d’hiver ont augmenté (voir [Figure 50](#)), et une partie des surfaces correspondantes basculent vers des cultures de printemps, ce qui pose des difficultés d’ordre logistique (réorganisation des flux) et de disponibilité en semences pour répondre à ces besoins non provisionnés. Cette fluctuation de la demande en semences pour des cultures de printemps est extrêmement complexe à anticiper, et pose des difficultés en termes de quantités de semences à produire, de stockage, de mise à disposition des doses nécessaires ...



**Figure 50** : Evolution des surfaces de cultures d’hiver et de printemps en France métropolitaine depuis 2010 – Source : Agreste

Dans les territoires d’Outre-mer, les enjeux de sécurisation sanitaire des semences et plants sont très importants. En effet, certains organismes absents (insectes, champignons, bactéries, virus...) ou plantes dites « envahissantes » sur ces territoires pourraient présenter de forts risques en cas d’introduction et/ou de propagation<sup>[S29]</sup>.

Par exemple, des risques ont été identifiés par l’ANSES sur les cultures d’ignames et de patates douces, dont le système semencier, basé sur la multiplication végétative, n’est pas sécurisé. Cette situation a notamment eu pour conséquence une dégradation de l’état sanitaire des cultures. Ainsi, l’ANSES recommande de structurer la filière racines et bulbes dans les territoires d’outre-mer afin de garantir un système de multiplication végétatif durablement sain et performant, en ayant recours par exemple aux vitroplants<sup>[B67]</sup>.

Face au développement de nouvelles cultures adaptées à de nouvelles conditions environnementales, la filière française « Semences et Plants », du fait de sa compétitivité, de son savoir-faire et de la diversité des espèces travaillées (des pérennes aux annuelles, des arbres aux céréales), saura dans la majorité des cas s’adapter aux contraintes spécifiques posées par la biologie de la reproduction de nouvelles espèces. Il faudra toutefois être vigilant sur la persistance de filières de formations professionnelles adaptées.

## **I. Synthèse du WP2**

Face aux enjeux imposés par le changement climatique, il est nécessaire de préciser la cible pour l'innovation et la sélection variétale afin d'atténuer ses effets et/ou de s'adapter au mieux, et œuvrer à favoriser la résilience des cultures face au climat.

Pour cela, le travail de sélection variétale dans les espèces cultivées, mais aussi le choix de nouvelles espèces à développer, peut notamment s'appuyer sur l'exploration de l'espace phénotypique des différentes espèces cultivées, résultante de la plasticité phénotypique et de la variabilité génétique, et responsable de leurs adaptations. Un certain nombre de traits d'intérêt ont été identifiés via les questionnaires adressés aux sections et inter-sections du CTPS, ainsi que dans la littérature : on citera par exemple les traits en lien avec l'utilisation de l'eau, la tolérance à la chaleur ou à la sécheresse, la modification de la phénologie pour échapper aux stress ou encore la tolérance à l'excès d'eau.

Les interactions Génotypes – Environnement complexifient le travail de sélection, et ce d'autant plus dans le contexte du changement climatique. Le CS du CTPS propose d'extraire des éléments génériques (qui recouvrent un ensemble de traits) afin de préciser les cibles de sélection qui lui semblent prioritaires pour chacune des espèces cultivées. Pour répondre aux enjeux du changement climatique, il faudra opérer un basculement des priorités pour un grand nombre d'espèces, passant de l'amélioration du potentiel de rendement à une stabilisation du rendement par l'amélioration de la résistance aux stress abiotiques et à une meilleure utilisation des nutriments. L'enjeu de la résistance aux stress biotiques est également renforcé pour de nombreuses espèces.

Il apparaît par ailleurs essentiel de considérer l'apport des ressources phylogénétiques dans l'adaptation au changement climatique, car elles composent un véritable réservoir d'allèles d'intérêt. Ces ressources phylogénétiques sont elles-mêmes menacées par le changement climatique, et leur conservation revêt une importance cruciale afin de maintenir la diversité accessible.

Le changement climatique va probablement contraindre le système agricole à la diversification, que ce soit à travers l'introduction de nouvelles espèces adaptées aux conditions climatiques rencontrées dans les différents territoires, ou par la diversification à l'échelle de la parcelle agricole (mélanges par exemple).

La filière française Semences et Plants va également devoir s'adapter afin de maintenir sa compétitivité : la production de semences et plants de certaines espèces pourra se révéler plus complexe qu'à l'heure actuelle, et des problèmes de quantité et de qualité (germinative et sanitaire) pourront advenir plus fréquemment.

## WP3 : Etat des lieux des avancées des sections sur la prise en compte du changement climatique dans leurs travaux

### A. Exposition aux stress biotiques et abiotiques

#### 1. Quels sont les principaux stress auxquels sont confrontées les cultures végétales travaillées par les Sections du CTPS ?

La 1<sup>ère</sup> question du questionnaire adressé aux sections et inter-sections du CTPS (Annexe 1) visait à recueillir les stress les plus impactants pour les espèces de leur section, ainsi que la fréquence à laquelle ce stress était susceptible de se produire, parmi une liste préétablie.

Les stress ont été soit classés de 1 (le moins impactant) à 10 (le plus impactant), soit notés entre 1 (faible impact) à 10 (fort impact) par les différents répondants (*lié à un problème de formulation et/ou de compréhension de la question*). Certains répondants ont néanmoins noté au-delà de 10 en ajoutant des stress supplémentaires à la liste proposée. Les fréquences ont été estimées entre 1 (se produit une fois tous les 5 ans) et 5 (se produit plusieurs fois par an et tous les ans).

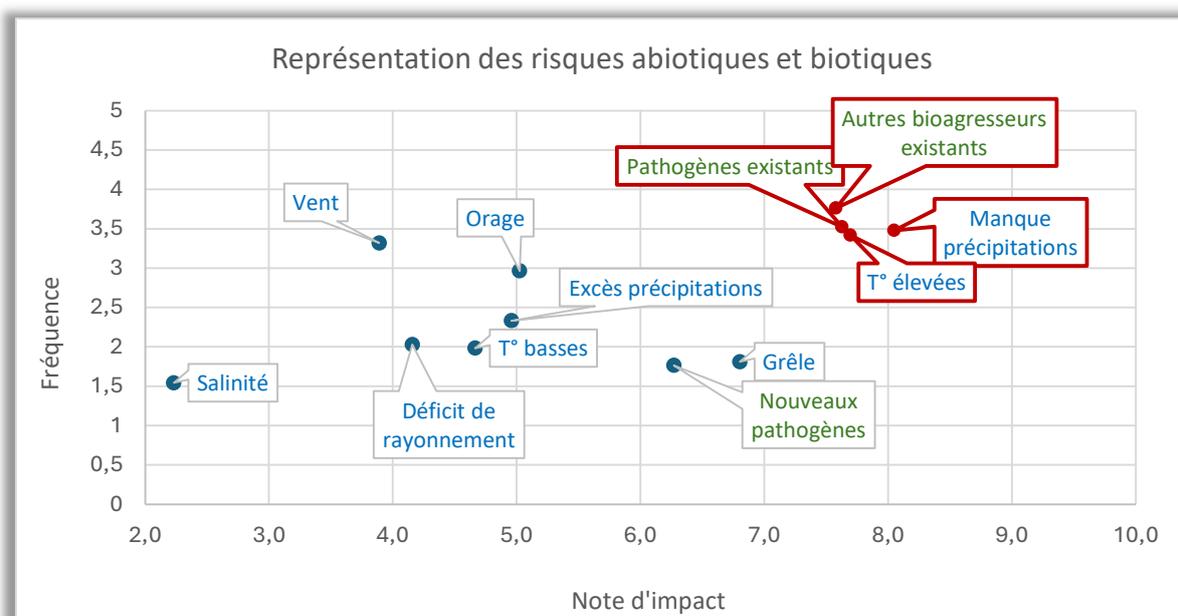
Certaines sections ont présenté une réponse unique, d'autres ont agrégé les réponses de chacun des répondants, d'où la possibilité d'avoir des données multiples (pseudo-réplicats par section).

Les tableaux de données des impacts et fréquences des différents stress sont présentés ci-dessous (Tableau 6, Tableau 7, Tableau 8).

Cinq stress se détachent particulièrement en termes d'impact : la grêle, le manque de précipitations (= sécheresse), les températures élevées, la pression des pathogènes existants et la pression des autres bioagresseurs. Il est à noter que ces stress, à l'exception de la grêle, sont également les stress les plus fréquents à dire d'experts.

Le manque de précipitations est jugé comme très impactant (notes supérieures à 6) pour l'ensemble des cultures, à l'exception des espèces légumières et des fraises.

A partir des notes d'impact (I) et de fréquence (F) des différents stress, on peut établir une note de risque (R), calculée selon la formule  $R = I \times F$ .



**Figure 51** : Représentation des risques abiotiques et biotiques selon la moyenne des notes d'impact et la moyenne de fréquences de survenue du risque, d'après l'ensemble des réponses consolidées des sections et inter-sections du CTPS

Une représentation graphique de cette évaluation des risques est présentée sur la [Figure 51](#), en moyennant l'ensemble des données d'impact et de fréquence obtenues.

On retrouve ainsi deux risques abiotiques majeurs, le manque de précipitations et les températures élevées, et deux risques biotiques majeurs, la pression des pathogènes existants et celle des autres bioagresseurs existants.

Dans la suite de cette partie, nous nous concentrerons sur les stress abiotiques, car les stress biotiques relevés dans le questionnaire ne sont pas nécessairement en lien avec le changement climatique.

**Tableau 6** : Note d'impact des différents stress biotiques et abiotiques, attribuée par les sections et commissions inter-sections du CTPS

Espèces / Impacts	Grêle	Orage	Vent	Manque précipitations	Excès précipitations	T° basses	T° élevées	Pathogènes existants	Autres bioagresseurs existants	Nouveaux pathogènes	Déficit de rayonnement	Augmentation du CO <sub>2</sub>	Salinité
Betterave sucrière	3,2	4,3	1,0	7,0	4,2	4,6	5,6	8,0	8,0	9,0	3,0	1,0	1,0
Céréales à paille	8,4	6,7	4,5	7,7	6,2	4,9	6,3	5,9	5,8	4,3	4,0		1,0
Chanvre	7,0	10,0	9,0	8,0	2,0	4,0	5,0	3,0	6,0	1,0			
Plantes de services	5,0		1,0	8,0	3,0	4,0	7,0	5,5	6,5	1,0	3,0	2,0	
Colza	2,5	4,5	2,0	10,0	7,0	4,5	6,5	8,0	9,0	2,5	2,5	1,0	
Lin fibre	10,0	9,0	5,0	7,0	4,0	1,0	3,0	9,0	6,0				
Lin oléagineux				10,0	6,0	4,0	9,0	8,0	7,0		5,0		
Maïs	7,7	7,0	6,1	10,4	5,5	4,6	9,0	6,3	7,7	4,3	3,2	1,5	2,0
Plantes fourragères et à gazon	4,0	1,0	1,0	10,0	3,0	3,0	8,0	8,0	5,0		1,0	1,0	2,0
Plantes protéagineuses	5,0	4,0		9,0	3,0	2,0	10,0	8,0	8,0		6,0		
Pomme de terre	4,0	4,0	4,0	10,0	7,0	4,0	9,0	10,0	8,0	8,0	3,0	4,0	1,0
Soja	10,0			8,0	6,0	4,0	7,0	4,0	9,0				
Sorgho	4,5		4,0	10,0	5,0	7,5	7,0	5,0	4,0	0,5	5,0	1,0	
Tournesol	10,0		3,0	6,0	3,0	4,0	7,0	5,0	6,5	8,0	1,0		
Vigne	10,0	3,0	2,0	9,0	7,0	11,0	8,0	6,0	4,0	5,0			1,0
<b>POPAM</b>													
POPAM (hors sol et pleine terre)	9,0	6,0	7,0	10,0	4,0	3,0	11,0	8,0	12,0	13,0	5,0	1,0	2,0
POPAM (sous serre)	4,0	3,0	2,0	6,0	1,0	1,0	7,0	9,0	10,0	8,0	5,0	1,0	1,0
<b>Espèces légumières</b>													
Chou-fleur	5,0	1,0	2,0	5,0	5,0	5,0	10,0	10,0	10,0				
Courgette	7,0	5,0	5,0	2,0	7,0	6,0	5,0	10,0	10,0	10,0			5,0
Haricot	10,0	5,0	5,0		10,0	10,0	10,0	10,0	10,0				
Laitue	10,0	2,0	2,0	5,0	2,0	2,0	6,0	9,0	3,0	9,0			4,0
Radis	10,0	10,0			5,0	5,0	10,0	10,0	10,0		10,0		
<b>Espèces fruitières</b>													
Fraises	3,0	4,0	5,0	9,0	6,0	4,0	8,0	11,0	10,0	12,0	7,0	1,0	2,0
Fruits (hors petits)	9,0	5,0	5,0	8,0	5,0	7,5	8,0	5,0	5,0	6,0	4,0	2,0	6,0
Pommiers à cidre	5,0	6,0	6,0	10,0	7,0	6,0	10,0	9,0	9,0	5,0	3,0	2,0	1,0
<b>Moyenne</b>	6,8	5,0	3,9	8,0	5,0	4,7	7,7	7,6	7,6	6,3	4,2	1,5	2,2

**Tableau 7** : Estimation de la fréquence pour les différents stress biotiques et abiotiques, selon les sections et commissions inter-sections du CTPS

Espèce \ Fréquence	Grêle	Orage	Vent	Manque précipitations	Excès précipitations	T° basses	T° élevées	Pathogènes existants	Autres bioagresseurs existants	Nouveaux pathogènes	Déficit de rayonnement	Augmentation du CO <sub>2</sub>	Salinité
Betterave sucrière	1,0	1,6	2,5	2,8	1,6	1,3	2,7	3,8	2,6	2,3	1,3		1,0
Céréales à paille	1,2	3,3	4,1	3,2	1,6	1,6	3,6	4,0	3,8	1,1	1,4		1,0
Chanvre	3,0	5,0	5,0	5,0	4,0	3,0	5,0	2,0	4,0	2,0			
Plantes de services	1,0		4,0	3,0	1,0	1,0	2,0	1,0	2,0	1,0	1,0		
Colza	2,0	4,5	2,5	4,0	2,5	2,0	3,0	4,0	4,0	1,5	2,0		
Lin fibre	2,0	2,0	2,0	3,0	3,0	1,0	1,0	5,0	4,0				
Lin oléagineux				3,5	2,5	2,0	4,0	2,0	2,0		2,0		
Maïs	2,4	3,5	3,8	4,1	2,0	2,0	3,2	3,5	4,7	1,0	1,8		1,0
Plantes fourragères et à gazon	1,0	3,0	3,0	3,0	1,0	1,0	3,0	3,0	2,0		4,0	3,0	2,0
Plantes protéagineuses	2,0	2,0		5,0	1,0	1,0	5,0	5,0	5,0		4,0		
Pomme de terre	1,0	2,0	3,0	3,0	2,0	1,0	4,0	5,0	5,0	2,0	1,0		1,0
Soja	1,0			3,0	1,0	1,0	2,5	1,0	1,0				
Sorgho	3,0		4,0	4,0	3,0	2,0	4,0	4,0	3,0	2,0	2,0		
Tournesol	1,0		2,0	3,0	3,0	3,0	2,5	4,0	4,5	1,0	1,0		
Vigne													
<b>POPAM</b>													
POPAM (hors sol et pleine terre)	1,0	2,0	2,0	3,0	3,0	1,0	3,0	3,0	4,0	3,0	2,0		1,0
POPAM (sous serre)													
<b>Espèces légumières</b>													
Chou-fleur	1,0	2,0	2,0	2,0	1,0	1,0	3,0	5,0	4,0				
Courgette	4,0	5,0	5,0	4,0	4,0	4,0	5,0	5,0	5,0	4,0			2,0
Haricot	1,0	2,0	2,0		1,0	1,5	2,0	1,0	2,0				
Laitue	1,0	3,0	5,0	5,0	3,0	5,0	5,0	5,0	5,0				5,0
Radis	1,0	2,0			1,0	1,5	2,0	1,0	2,0		1,0		
<b>Espèces fruitières</b>													
Fraises	3,0	1,0	2,0	3,0	5,0	1,0	5,0	5,0	5,0	1,0	5,0		1,0
Fruits (hors petits)	2,5	4,0	5,0	3,5	2,0	4,0	5,0	4,0	4,0	2,0	4,0		1,0
Pommiers à cidre	2,0	5,0	5,0	4,0	3,0	2,0	4,0	4,0	4,0	1,0	1,0		2,0
<b>Moyenne</b>	1,7	2,9	3,4	3,5	2,3	1,9	3,5	3,5	3,6	1,8	2,2		1,6

**Tableau 8** : Note de risque calculée d'après les notes d'impact et l'estimation de la survenue des différents stress biotiques et abiotiques par les sections et commissions inter-sections du CTPS

Espèce \ Risque	Grêle	Orage	Vent	Manque précipitations	Excès précipitations	T° basses	T° élevées	Pathogènes existants	Autres bioagresseurs existants	Nouveaux pathogènes	Déficit de rayonnement	Augmentation du CO2	Salinité
Betterave sucrière	3,2	6,8	2,5	19,3	6,7	6,0	14,9	30,7	20,8	20,3	3,9		1,0
Céréales à paille	9,8	22,0	18,5	24,8	9,8	7,9	22,4	23,7	21,6	4,6	5,6		1,0
Chanvre	21,0	50,0	45,0	40,0	8,0	12,0	25,0	6,0	24,0	2,0			
Plantes de services	5,0		4,0	24,0	3,0	4,0	14,0	5,5	13,0	1,0	3,0		
Colza	5,0	20,3	5,0	40,0	17,5	9,0	19,5	32,0	36,0	3,8	5,0		
Lin fibre	20,0	18,0	10,0	21,0	12,0	1,0	3,0	45,0	24,0				
Lin oléagineux				35,0	15,0	8,0	36,0	16,0	14,0		10,0		
Maïs	18,4	24,5	23,5	43,2	11,0	9,1	28,5	22,0	36,4	4,3	5,7		2,0
Plantes fourragères et à gazon	4,0	3,0	3,0	30,0	3,0	3,0	24,0	24,0	10,0		4,0	3,0	4,0
Plantes protéagineuses	10,0	8,0		45,0	3,0	2,0	50,0	40,0	40,0		24,0		
Pomme de terre	4,0	8,0	12,0	30,0	14,0	4,0	36,0	50,0	40,0	16,0	3,0		1,0
Soja	10,0			24,0	6,0	4,0	17,5	4,0	9,0				
Sorgho	13,5		16,0	40,0	15,0	15,0	28,0	20,0	12,0	1,0	10,0		
Tournesol	10,0		6,0	18,0	9,0	12,0	17,5	20,0	29,3	8,0	1,0		
Vigne													
<b>POPAM</b>													
POPAM (hors sol et pleine terre)	9,0	12,0	14,0	30,0	12,0	3,0	33,0	24,0	48,0	39,0	10,0		2,0
POPAM (sous serre)													
<b>Espèces légumières</b>													
Chou-fleur	5,0	2,0	4,0	10,0	5,0	5,0	30,0	50,0	40,0				
Courgette	28,0	25,0	25,0	8,0	28,0	24,0	25,0	50,0	50,0	40,0			10,0
Haricot	10,0	10,0	10,0		10,0	15,0	20,0	10,0	20,0				
Laitue	10,0	6,0	10,0	25,0	6,0	10,0	30,0	45,0	15,0				20,0
Radis	10,0	20,0			5,0	7,5	20,0	10,0	20,0		10,0		
<b>Espèces fruitières</b>													
Fraises	9,0	4,0	10,0	27,0	30,0	4,0	40,0	55,0	50,0	12,0	35,0	1,0	2,0
Fruits (hors petits)	22,5	20,0	25,0	28,0	10,0	30,0	40,0	20,0	20,0	12,0	16,0		6,0
Pommiers à cidre	10,0	30,0	30,0	40,0	21,0	12,0	40,0	36,0	36,0	5,0	3,0		2,0
<b>Moyenne</b>	11,2	16,1	14,4	28,7	11,3	9,0	26,7	27,8	27,3	12,1	9,3		5,5

2. Quelles sont les mesures de sécurisation des essais qui ont été mises en place en réponse à ces stress abiotiques ?

A la suite de la question portant sur la classification des stress se posait la question de la mise en place de moyens de sécurisation des essais.

La grêle, l'orage et le vent sont des aléas difficilement prévisibles et pour lesquels il est difficile de trouver des moyens de sécurisation. La section « Tournesol Soja » fait mention de l'existence de couloirs de grêle qui sont des zones à éviter, et certains vergers sont équipés de filets paragrêle, comme sur les essais sur pommiers.

Pour les espèces présentant une sensibilité forte aux températures basses, voire au gel, la section « Espèces fruitières » déclare avoir mis en place des systèmes de lutte antigel qui permettent de limiter les dégâts, avec système d'avertissement et personnel de permanence. On retrouve également des mesures de sécurisation sur la vigne, avec des zones équipées en chaufferette ou avec des systèmes d'aspersion. Néanmoins, l'efficacité de ces moyens de sécurisation reste limitée si les températures sont trop basses.

Pour pallier les épisodes de manque de précipitations, de nombreuses sections ont recours à l'irrigation lorsque cela est possible. Certaines sections vont également décaler le semis pour limiter le risque d'exposition au stress hydrique (maïs et sorgho, céréales à paille, CISPS, Plantes protéagineuses).

3. Un pilotage actif a-t-il été mis en place dans les réseaux d'essais ou dispositifs d'évaluation pour se confronter volontairement aux stress abiotiques ?

Le questionnaire adressé aux sections et inter-sections du CTPS devait leur permettre d'expliquer si un pilotage actif était mis en place pour se confronter volontairement aux stress abiotiques les plus impactants pour les espèces de leur groupe.

De manière générale, seule la section « Maïs et Sorgho » a mis en place un pilotage actif dans le cadre du **Sorgho grain** afin de se confronter au stress de la sécheresse. En effet, le réseau d'essais est dédoublé en deux conduites :

- Une conduite « Limitante » en disponibilité hydrique, dans laquelle la densité de semis et la fertilisation sont plus faibles. Seule l'irrigation pour un sauvetage de l'implantation à la levée est autorisée
- Une conduite « Non Limitante » avec une bonne alimentation hydrique, et des densités de semis et une fertilisation azotée ajustées aux potentiels des sites.

Néanmoins, l'espèce **Maïs** commence à adapter son réseau expérimental au manque de précipitations, en choisissant notamment des zones plus stressantes, à potentiel plus limitant, ou encore en recherchant des situations de sols superficiels. Par ailleurs, la conduite des essais peut permettre une duplication du même essai sous deux conduites hydriques contrastées.

La section **Céréales à Paille** explique de son côté adapter son réseau d'essais, à travers l'ajout de lieux plus au Sud que jusqu'alors.

Pour l'ensemble des autres sections, il n'y a pas de pilotage spécifique pour se confronter à ces stress (Vigne / Betteraves et chicorée industrielle / Tournesol Soja / Lin et Chanvre / Pomme de terre / Colza et autres crucifères / CISPS / Plantes fourragères et à gazon, ainsi que pour les Espèces Fruitières, les Espèces Légumières et les POPAM qui n'ont pas d'épreuve VATE).

#### 4. Comment ces stress abiotiques sont-ils pris en compte dans les analyses DHS et/ou VATE ?

Pour conclure cette partie du questionnaire consacrée aux stress biotiques et abiotiques, il était demandé aux sections de préciser la manière dont ces stress étaient pris en compte dans les analyses DHS et/ou VATE.

Lors de la survenue d'un stress abiotiques deux types de prise en compte antagonistes peuvent être observés (à condition que l'information de la survenue du stress soit clairement connue et identifiée, ce qui n'est pas toujours le cas à l'heure actuelle dans certaines sections) :

- L'inclusion des essais et leur valorisation,
- Ou à l'inverse, la suppression de l'essai ou des parcelles concernées dans l'essai et un phénomène d'évitement de la problématique. Les difficultés entraînant la non prise en compte des stress abiotiques dans les analyses DHS et VATE sont explorées plus en détail dans le paragraphe b.

##### a. Valorisation des stress rencontrés dans les essais

La valorisation peut s'entendre comme :

- Une valorisation « standard », au sens où on intègre l'essai dans l'analyse globale du réseau, en considérant qu'il s'agit d'une occurrence représentative de l'échantillon de climats
- Une valorisation "spécifique", c'est-à-dire extraction d'une information de réponse des variétés au stress particulier qui a affecté l'essai en question

Depuis 2021, les essais **Sorgho grain** peuvent donner lieu à l'attribution d'un bonus de stabilité pour les variétés qui ont un bon rendement à la fois sous conduite non limitante, et sous conduite limitante (après regroupement des essais *a posteriori* pour tenir compte de la réalité rencontrée sur le terrain). De plus, il est possible de refuser à l'inscription une variété qui performe bien en conditions non limitantes mais qui est faible en conduite limitante.

La Section **Betteraves et Chicorée industrielle** a, par le passé, valorisé l'information d'un stress survenu au cours des évaluations VATE de betterave sucrière : en effet, lors de la campagne 2018, certaines expérimentations ayant subi, à dire d'experts, un fort stress hydrique, ont été regroupées à titre indicatif dans le rapport technique « Nouvelles variétés de Betterave Sucrière proposées à l'inscription sur la Liste A du Catalogue Officiel Français en janvier 2020 »<sup>[S30]</sup> dont un extrait est présenté dans la Figure 52.

Cette classification n'a cependant pas été renouvelée dans les années ultérieures à 2018.

Variété	Essais forte pression rhizomanie		Essais avec cercosporiose*	Essais sous stress hydrique*
	% Niveau 100	% témoin FPR	% Niveau 100	% Niveau 100
BTS 6740	119.85	106.74	106.70	97.40
Cettinia KWS	117.77	104.97	98.90	96.50
Chaplin	91.81	82.04	98.50	96.80
Cocoon	96.86	86.79	96.70	100.70
Eldorana KWS	113.70	101.38	99.60	98.90
FD Crawl	99.02	88.53	97.80	100.80
FD Olympique	101.75	90.88	101.20	105.90
FD Volley	112.86	100.73	99.40	102.90
Florentina KWS	118.94	106.04	102.10	107.10
Giono	104.93	93.84	98.50	106.80
Gounod	120.12	107.13	99.70	99.90
Janiqua KWS	118.78	105.88	99.20	99.80
Mobidick	100.46	89.78	96.70	100.20
Musset	107.20	95.76	99.10	104.10
Novalina KWS	127.07	113.26	108.30	105.90
Samourai	102.70	91.84	101.70	108.80
Topaze	94.96	84.98	92.10	106.80
Totem	99.53	88.94	100.70	107.20

**Figure 52** : Extrait du rapport technique « Nouvelles variétés de Betterave Sucrière proposées à l'inscription sur la Liste A du Catalogue Officiel Français en janvier 2020 » sur laquelle figure une colonne de regroupement des essais sous stress hydrique – Source : S30

## b. Evitement des stress rencontrés dans les essais

Il y a, de manière générale, très peu de confrontation volontaire aux stress liés au changement climatique, et donc très peu de valorisation de données et d'informations lors de la survenue de ces stress.

Lorsqu'un stress est subi sur une culture de **Céréales à Paille** ou colza (manque de précipitation et/ou fortes températures), l'essai est écarté du regroupement effectué pour les analyses technologiques.

Pour les autres sections, la décision de suppression des données issues des parcelles ayant subi les aléas climatiques se fait généralement lors de la Commission de Validation des Essais.

## **B. Difficultés rencontrées au cours des cycles DHS / VATE**

Le questionnaire devait permettre aux sections de faire remonter le fait, ou non, que les instabilités climatiques aient impacté la réussite des essais, ainsi que les difficultés rencontrées au cours des cycles DHS / VATE en lien avec le changement climatique.

De manière globale, la quasi-totalité des sections a fait remonter le fait que des instabilités climatiques impactent fortement la réussite des essais et donc le fonctionnement des dispositifs expérimentaux (à l'exception de l'espèce Soja qui ne note pas d'évolution flagrante), conduisant parfois à l'abandon de l'essai si les impacts sont trop importants (grêle par exemple) ou que le recours à une mesure de sauvegarde de l'essai (irrigation principalement) n'est pas possible. En vigne, où il est fréquent que seuls deux essais VATE soient mis en place, il faut parfois prolonger la durée de l'évaluation d'une ou plusieurs années en cas de perte des données.

Deux instances (CISPS et Céréales à Paille) font remonter le besoin d'objectiver ces ressentis relatifs à une plus grande instabilité des comportements variétaux, en lien avec un effet année prépondérant. La section Céréales à Paille propose par exemple de se baser sur les travaux du projet CASDAR Stable pour éclairer ce point.

Les difficultés rencontrées sont de deux natures : techniques et méthodologiques

### 1. Difficultés techniques

Parmi les difficultés techniques évoquées par les sections, on retrouve notamment :

- **La conduite des essais :**
  - En effet, les conditions pluvieuses au printemps engendrent des semis tardifs, suivis parfois de périodes séchantes : il en résulte des lins courts non teillables (*Section Lin et Chanvre*).
  - Certaines années, les plages de récolte ensilage sont fortement réduites, et il est compliqué d'arriver au bon moment dans les champs sur un réseau entier (*Section Maïs et Sorgho*)
  - Difficultés d'implantation des cultures à cause des sécheresses estivales (*Section Colza et autres Crucifères*)
- **La modification de la phénologie :**
  - Cela pose notamment des difficultés lors des évaluations DHS car les cycles s'accélèrent, et les périodes d'observation et de notation peuvent se trouver raccourcies (*Sections Vigne, Céréales à Paille, Lin et Chanvre, Espèces Fruitières, Tournesol Soja*)
  - Chez le chanvre, le déclenchement de la floraison est thermo-photopériodique. Les périodes de floraison commencent parfois en avance, en raison des phases de forte chaleur sur la période de fin mai et courant du mois de juin. Les floraisons sont donc plus longues ou se répartissent en deux périodes. Les chantiers de récolte peuvent ainsi devenir plus compliqués

avec certaines graines à maturité tandis que les autres sont encore en remplissage (*Section Lin et Chanvre*).

- Maturités accélérées chez le soja en cas de forte sécheresse mais redémarrages possibles de végétation en cas de retour de la pluie, ce qui a pour conséquence des différences de groupes de précocité pouvant ainsi se retrouver difficiles à évaluer.
- La remise en question de la **pertinence des observations morphologiques** :
  - En lin, il a par exemple été remonté que les plantes souffrant de la chaleur pouvaient modifier leur phénotype pour certains caractères, rendant les notations DHS complexes (*Section Lin et Chanvre*).
  - Pour certaines espèces fruitières, il est régulièrement noté l'apparition de fruits déformés sur certaines variétés (liée au gel de l'année précédente ou aux fortes températures), ce qui entraîne des calibres de fruits difficilement harmonisables pour la comparaison entre variétés lors des évaluations DHS, selon les sensibilités de variétés (*Espèces Fruitières*).
- Des **valeurs hors-norme** :
  - Pour le maïs, il arrive que les plages d'humidité à la récolte soient en dehors des règles de décision fixées et la section réfléchit d'ailleurs à une possible modification des seuils (*Section Maïs et Sorgho*).
  - Les teneurs en glucosinolates, qui sont des molécules de défense et qui constituent un facteur antinutritionnel, peuvent être très variables depuis quelques années et se situer en dehors des normes d'inscription (norme VATE inférieure à 18 µmoles/g), y compris pour des variétés témoins qui ont été inscrites auparavant avec des teneurs inférieures au seuil fixé. Si les témoins sortent de la gamme, alors les données glucosinolates de l'essai seront écartées (*Section Colza et autres Crucifères*).
  - Les à-coups thermiques, couplés au stress hydrique, induisent des modifications de comportement physiologique de certaines variétés et entraînent des défauts de qualité sur les tubercules (seconde tubérisation, hétérogénéité d'aptitude culinaire et technologiques des tubercules ...) (*Section Pomme de Terre*).
- Une **pression accrue des ravageurs**
  - Les hivers doux entraînent le développement de certaines maladies sur les cultures d'hiver (*Sections Céréales à Paille, Colza et autres Crucifères*).
  - Les températures chaudes sont favorables à l'augmentation de la pression des insectes, impactant certains essais (*Section Lin et Chanvre*).
  - Les températures plus clémentes en hiver et plus douces au printemps semblent faire proliférer les populations de pigeons et compliquent l'implantation des cultures de chanvre (*Section Lin et Chanvre*).
  - Les problèmes de ravageurs sont accentués du fait de conditions favorables, et la réémergence d'anciens ravageurs est observée (cochenille, pucerons, psylles, ...), en raison de la diminution conjointe de la pression pesticide (*Section POPAM*).

## 2. Difficultés méthodologiques

Parmi les difficultés méthodologiques évoquées par les sections, on retrouve notamment le fait que :

- **Les années se suivent et ne se ressemblent plus**
  - Le comportement des variétés peut varier d'une année à une autre (*Section Betteraves et Chicorée industrielle et Section Pomme de Terre*)
  - Or, le profil des variétés inscrites dépend beaucoup des conditions climatiques des années d'inscription, et surtout de la 1<sup>ère</sup> année. En effet, un 1<sup>er</sup> filtre peut avoir lieu à la fin de la première année d'inscription pour certaines espèces et des variétés en difficulté sont

écartées car les conditions rencontrées sont difficiles, alors qu'elles auraient pu accéder à la deuxième année d'inscription si les conditions avaient été plus clémentes (*Section Tournesol et Soja*)

- Les **données sont de plus en plus hétérogènes** :
  - La levée devient hétérogène et les essais deviennent moins précis (*CISPS*)
  - L'évaluation des variétés dans des situations limitées en eau entraînent des données plus hétérogènes qu'auparavant, et les analyses statistiques qui en découlent peuvent conduire à abandonner les essais (*Section Maïs et Sorgho*)
  - De plus, il est plus fréquent de constater une augmentation des erreurs dans les essais avec l'effet année qui impacte les génétiques et les classements entre variétés (*Section Betteraves et Chicorée industrielle*)
  
- Le **nombre d'essais retenus est en diminution** :
  - Chaque année, un nombre conséquent d'essais est perdu. En VATE, certaines années, le nombre d'essais validés en Commission de Validation des Essais peut être très bas (*Section Plantes protéagineuses*).
  - Jusqu'à maintenant, il n'y a pas eu d'adaptations trouvées en dehors d'un maintien d'un nombre d'essais minimum par groupe de précocité et un nombre d'essais suffisant en milieu moins sensibles aux aléas (ex : sol profond) pour chaque groupe de précocité (*Section Maïs et Sorgho*).
  - La section Tournesol a été contrainte de modifier le règlement technique afin de permettre l'inscription avec moins d'essais que précédemment préconisé (*Section Tournesol et Soja*).

Là encore, il semble nécessaire d'objectiver cette donnée d'un nombre d'essais retenus en Commission de Validation des Essais qui serait en diminution, car les raisons pouvant conduire à la non-retenue d'un essai sont nombreuses et ne sont pas toutes dépendantes des conditions climatiques (incident technique sur la parcelle, ravageurs ...).

### **C. Craintes, verrous, freins et difficultés dans la prise en compte de l'adaptation au changement climatique dans les travaux d'évaluation variétale pour l'inscription au catalogue**

Les sections ont exprimé un certain nombre d'éléments relatifs aux difficultés dans la prise en compte de l'adaptation au changement climatique dans les travaux d'évaluation variétale pour l'inscription au catalogue, qui ont été regroupés dans les catégories ci-dessous :

- La « **Philosophie du CTPS et de la VATE** »
  - Le catalogue français n'est pas le seul accès au marché français. Il ne faudrait pas inciter certaines entreprises semencières à passer par un autre catalogue UE en raison d'une trop grande complexité du système français par rapport à d'autres systèmes (*Section Céréales à Paille*).
  - Le territoire européen constitue le marché pour les variétés évaluées, avec une disparité de politiques environnementales propres à chaque pays (*Section Colza et autres crucifères*)
  - Faut-il continuer à promouvoir une amélioration permanente des rendements agricoles (t/ha) ou faut-il promouvoir les variétés les plus résilientes au changement climatique ? (*Section Céréales à Paille*).
  - L'inscription au catalogue ne donne qu'une indication très partielle de la valeur de la variété en conditions stressantes alors que c'est très souvent la première question soulevée par l'utilisateur (*Section Maïs et Sorgho*).

- Le réseau d'essais est constitué de lieux de type plutôt « intensifs » avec des rendements nettement au-dessus du rendement moyen français, il n'est pas suffisamment représentatif des conditions rencontrées chez les agriculteurs (*Section Maïs et Sorgho*).
- **Les problématiques autour de la sélection**
  - La sélection dispose de moins en moins de temps pour remédier « à temps » aux différentes pressions biotiques et abiotiques. Cela nécessite des moyens financiers pour la sélection et l'évaluation des variétés de plus en plus conséquents (*Section Betteraves et Chicorée Industrielle*).
  - Il existe un risque de contre sélection en raison des irrégularités des conditions climatiques rencontrées d'une année sur l'autre (*Section Céréales à Paille*).
  - La projection des marchés futurs, avec l'impact du changement climatique, est compliquée à établir (*Section Céréales à Paille*).
- **La durée de l'évaluation**
  - Certaines sections évaluent des plantes pérennes, longues à étudier (*Section Vigne*).
  - D'autres sections ont en charge l'évaluation de plantes à cycle court sur lesquelles chaque stress est très préjudiciable (*Section Pomme de Terre*).
  - Sur 2 ans d'expérimentation au CTPS, il est très peu probable de rencontrer tous les types de stress. Il faudrait profiter des conditions climatiques de plus en plus variables pour tenter de ressortir une notification sur ce sujet mais cela restera conditionné par le facteur météo des années d'inscription (*Section Céréales à Paille*).
- **La complexité d'évaluer la résistance des variétés aux stress climatiques** car
  - Il s'agit de stress multiples et qui interagissent entre eux (*Section Maïs et sorgho et Section Céréales à Paille*)
  - Il est nécessaire de déterminer les indicateurs les plus pertinents pour caractériser le multi-stress et « clustériser » les essais (*Section Maïs et sorgho et Section Céréales à Paille*)
  - Il n'y a pas de stabilité pluriannuelle des divers stress recherchés (*Section Betteraves et Chicorée Industrielle*).
  - Les aléas climatiques, imprévisibles, font que le changement climatique ne se fait pas sentir tous les ans de façon marquée (*Section Plantes Fourragères et à Gazon*)
  - Il n'existe pas encore de protocole ni de méthodologie pour évaluer ces stress (*Section Vigne, Section Pomme de Terre et Section Plantes Protéagineuses*)
  - Les variétés sont trop rapidement éliminées (après l'année 1), alors qu'elles sont évaluées sur des années très différentes (*Section Betteraves et Chicorée Industrielle et Section Tournesol Soja*)
- **Des difficultés à caractériser ce qui est subi**
  - Il manque parfois des données par manque d'outil disponible pour caractériser les stress rencontrés (*Section Tournesol Soja*)
  - Il n'y a pas de caractérisation pédoclimatique des essais (*Section Maïs et Sorgho*)
  - Il est nécessaire de mieux caractériser les essais afin de déterminer les stress rencontrés et pouvoir potentiellement regrouper les essais par type de stress. La caractérisation plus fine des essais avec des données agro-environnementales permettrait de disposer d'essais interprétables (dans des situations d'hétérogénéité), de mieux comprendre et qualifier les stress exprimés (azote, eau, adventices, maladies) et d'évaluer des comportements variétaux en situation de stress (*Section Céréales à Paille*)

- Il est important de se donner les moyens d'évaluer à quel niveau de stress la variété commence à décrocher au niveau rendement et pérennité. Ainsi il sera possible d'inscrire des variétés adaptées à des niveaux de stress différents qui correspondront à différentes zones pédoclimatiques à définir au cours du temps avec le changement climatique (*Section Espèces fourragères et à gazon*)
- **Les dispositifs expérimentaux**
  - Il est compliqué de transposer les résultats sur les 2 sites VATE à d'autres terroirs (*Section Vigne*)
  - La taille des réseaux est limitée, et cela interroge sur le nombre d'essais suffisants compte tenu du taux de réussite. Il faut aussi tenir compte des disponibilités en semences au moment des dépôts, qui peut être elle aussi limitée (*Section Maïs et Sorgho*)
  - L'évaluation du potentiel des variétés de tournesol en conditions sèches est très imprécise. Il faut donc multiplier le nombre d'essais, ce qui est économiquement difficile (*Section Tournesol Soja*)
  - Les dispositifs expérimentaux sont à construire avec un dimensionnement raisonnable et il faut considérer les coûts de mise en œuvre de ceux-ci (*Section Pomme de Terre*)
  - Les limites budgétaires sont un verrou (*Section Maïs et Sorgho et Section Céréales à Paille*)
  - Il y a des difficultés d'évaluation en conditions stressantes en raison de l'augmentation du risque d'échec de l'essai (*Section Céréales à paille*)
  - Il faut s'assurer de ne pas perdre trop de moyens expérimentaux (par exemple la fermeture du site INRAE de Chaux-des-Près pour évaluer la résistance intrinsèque au froid des variétés de pois et de féverole d'hiver) (*Section Plantes protéagineuses*)
  - Il y a une nécessité de construire une chaîne de traitement de données adaptée pour délivrer une information en « temps réel » au cours des essais – (*Section Maïs et sorgho et Section Céréales à paille*)
  - L'enrichissement et l'optimisation des dispositifs peut être une solution tout comme l'usage de la modélisation sur la base de données phénotypiques, environnementales et génotypiques (*Section Maïs et Sorgho*)
  - Le partage de données acquises dans les différents réseaux d'évaluation est aussi une solution (par exemple, données complémentaires apportées par les déposants) (*Section Maïs et Sorgho*)
- **Les exigences statistiques**
  - L'interprétation de l'essai est parfois remise en cause car les stress entraînent une augmentation de l'erreur statistique dans les essais ainsi qu'une variabilité forte entre années pour des sites identiques (*Section Betteraves et Chicorée industrielle et Section Maïs et Sorgho*)
  - Les règles actuelles de validation des essais favorisent les essais dans des conditions non stressantes, et les essais à faible potentiel sont insuffisamment valorisés (*Section Tournesol Soja*)
  - Aujourd'hui toutes les variétés sont évaluées relativement à la moyenne des témoins. Différents groupes de maturité seront probablement opportuns (*Section Colza et autres crucifères*)
  - Il est nécessaire d'avoir un appui méthodologique pour l'exploitation des résultats, notamment sur les outils statistiques pour l'analyse spatiale des résultats, qui permet de corriger les effets terrains très marqués qui s'expriment lors de printemps secs (le moindre gradient de profondeur de terre impactant le rendement) (*Section Céréales à paille et Section Betteraves et Chicorée industrielle*)

- Une absence de récolte est indiquée comme une donnée manquante alors que c'est un résultat en soi. A la fin, seule la valeur moyenne globale sur l'ensemble des lieux est considérée (*Section Plantes fourragères et à gazon*)
- Il faut statuer sur la gestion des données hors-normes, telle que la teneur en glucosinolates ou encore le rendement en huile ou en protéines lors des épisodes de fortes températures (*Section Colza et autres Crucifères*)
- **La pression accrue des ravageurs**
  - Il y a une augmentation des insectes ravageurs sans pouvoir intégrer rapidement des résistances (*Section Colza et autres crucifères*)
  - On observe une plus forte fréquence des pathogènes et ravageurs, liée au changement climatique et aux stress abiotiques (*Section Betteraves et Chicorée Industrielle*)
  - Le contexte phytosanitaire propose une protection chimique de plus en plus réduite alors que la pression ne fait qu'augmenter (*Section Betteraves et Chicorée Industrielle*)
- **Les particularités des cultures en mélange et association**
  - Difficulté à évaluer les plantes compagnes (exemple : féveroles-colza, cameline-lentille), besoin de méthodologie (*CISPS*)
  - Elargir aux associations (*CISPS*)
  - Utilisation en mélange d'espèces (*Section Céréales à paille*)
- **L'absence d'épreuve VATE** : pas de caractérisation du comportement des variétés au niveau réglementaire, et il n'existe pas de caractérisation post-inscription systématique
  - *Espèces fruitières*
    - Les mécanismes liés aux impacts majeurs du changement climatique sur les variétés fruitières sont peu ou mal connus (dormance, besoins en froid, tolérance à la chaleur, etc...), il est donc difficile d'adapter les essais DHS pour limiter leur impact ou pour mieux caractériser les variétés
    - Si une VATE venait à se mettre en place (Valeur Culturelle et d'Utilisation Durable - VCUD - dans la proposition de nouveau règlement européen Matériel de Reproduction des Végétaux - MRV - publiée par la Commission Européenne en juillet 2023), un très gros travail de recherche devrait être lancé pour réussir à évaluer des caractères complexes (comportement des variétés vis-à-vis de l'eau, de l'azote, des minéraux, de la température...), d'autant plus sur les porte-greffes et sur les couples variétés / porte-greffe
  - *POPAM*
    - Les plantes ornementales ne sont pas soumises à l'inscription au catalogue. Un frein majeur à la prise en compte de l'adaptation au changement climatique est l'absence d'obligation de la part des obtenteurs de prendre en compte, dans les critères d'adaptation des plantes qu'ils sélectionnent, les contraintes du changement climatique. Pour ce qui concerne surtout les plantes fleuries, les sélections sont réalisées en très grande majorité par des entreprises multinationales pour des marchés mondiaux. Ces sélections se soucient peu des contraintes des sites de production dans la mesure où la production de ce type de plante est réalisée principalement en conditions contrôlées. Mais le changement climatique commence à concerner aussi ces conditions qui deviennent de plus en plus difficiles à contrôler. Les évaluations réalisées par ASTREDHOR intègrent des critères de consommation d'intrants, y compris l'eau, et de tolérance à un certain nombre de facteurs biotiques et abiotiques, pour renseigner les producteurs et les autres acteurs de la filière de la fleuristerie, du commerce et du paysage. Les modifications des facteurs climatiques sont ainsi, de fait, intégrées dans les critères d'évaluation des plantes.

- *Espèces légumières*
  - Si mise en place de la VCUD via le nouveau règlement MRV, faudra-t-il remettre l'évaluation des créneaux au cœur de l'évaluation ? (Par exemple, des variétés de laitue adaptées à chaque mois de plantation)

#### **D. Prise en compte du changement climatique dans les autres offices d'examen à l'international**

##### **1. Prise en compte dans les autres offices d'inscription / post-inscription**

Pour illustrer la prise en compte du changement climatique par les autres offices d'inscription et/ou post-inscription, le choix a été fait de s'intéresser à deux espèces : blé tendre d'hiver (BTH) et maïs (grain et fourrage).

###### **a. Conduite des essais en période de sécheresse**

En blé tendre d'hiver (BTH), en **France**, le protocole d'expérimentation pour les essais VATE pour la campagne 2024 fait état, à propos de l'irrigation : « *Si les conditions agro-pédo-climatiques le justifient et que la parcelle est irrigable, il est possible d'irriguer l'essai. Le déclenchement de cette irrigation se fera sur la base d'un suivi hydrométrique de la parcelle. L'irrigation devra être identique sur l'ensemble des modalités de l'essai* » <sup>[B68]</sup>.

En **Hongrie**, le protocole pour les essais VCU (Valeur Culturelle et d'Utilisation, équivalent de la VATE) en BTH précise que « *Les essais de performance sont effectués dans des conditions de précipitations naturelles. L'irrigation ne doit être donnée automatiquement que pour la levée. D'autres irrigations visant à sauver les cultures ne peuvent être effectuées que sur la base d'informations fournies par le directeur de la station et avec l'accord du responsable de l'essai variétal* » <sup>[B69]</sup>.

En **Australie**, il n'y a pas d'équivalent VCU. Cependant, le protocole des essais nationaux sur les variétés (NVT, programme d'évaluation indépendant pour les agriculteurs), fait la distinction entre l'irrigation d'appoint en cas de sécheresse (*apportée pour initier la germination et l'établissement de la culture, ou pour assurer la survie des plantes dans des zones traditionnellement de cultures pluviales*) et les essais irrigués (*pour les essais situés dans des zones où l'irrigation est courante et est utilisée comme source principale d'approvisionnement en eau tout au long du cycle*) <sup>[B70]</sup>.

Les protocoles VCU pour les essais BTH aux **Pays-Bas, en République Tchèque et en Allemagne** ne mentionnent pas la conduite de l'irrigation <sup>[B71, B72, B73]</sup>.

En maïs (fourrage et grain), en **France**, le protocole VATE ne mentionne pas l'irrigation des essais. Il est simplement rappelé que le recours à l'irrigation doit être remonté au même titre que les autres données agronomiques (date de semis, densité, surface, type de sol, intrants, traitements...) <sup>[B74, B75]</sup>.

En **Hongrie**, le protocole pour les essais VCU en maïs précise que « *Les essais de performance sont effectués dans des conditions de précipitations naturelles. L'irrigation ne doit être donnée automatiquement que pour la levée. D'autres irrigations visant à sauver les cultures ne peuvent être effectuées que sur la base d'informations fournies par le directeur de la station et avec l'accord du responsable de l'essai variétal* » <sup>[B76]</sup>.

Dans le protocole VCU des **Pays-Bas** pour le maïs, il est précisé que « *l'irrigation n'est permise que si elle est nécessaire pour garantir la validité de l'essai* » <sup>[B77]</sup>.

Le protocole VCU de **République Tchèque ou encore de l'Allemagne** pour le maïs ne mentionne pas la conduite de l'irrigation <sup>[B78, B79]</sup>.

## b. Tests spécifiques aux conditions abiotiques

En **France**, sur BTH, certains stress abiotiques sont évalués dans les essais VATE <sup>[B68, B80, B81]</sup> :

- Stress azoté, avec des essais menés à dose X et à dose X-80 d'azote
- Résistance au froid, avec des essais menés sur un site spécifique
- Résistance à la verse

En **Hongrie**, sur BTH, la résistance au froid est également évaluée via des tests en chambre de culture.

En **République Tchèque et en Allemagne**, sur BTH, la résistance au froid est également évaluée via une note de peuplement avant le gel (*Stav porostu před zámrzem (9–1) / Mängel im Stand vor Winter (1 - 9)*) et une note de peuplement après l'hiver (*Stav porostu po zimě (9–1) / Mängel im Stand nach Winter (1 - 9)*) comme mentionné dans le protocole des tests VCU sur céréales <sup>[B72, B73]</sup>.

En **Allemagne**, il y a également une note de résistance à la grêle qui permet d'estimer les pertes (*Hagelschaden, Ausfall, Vogelfraß (1 - 9)*) <sup>[B73]</sup>.

En **France**, sur maïs (fourrage et grain), le protocole VATE indique qu'il est possible d'attribuer une note vis-à-vis du comportement de la variété en cas de sécheresse (via le numéro de caractère 363 : Sécheresse (note de sensibilité de 1 à 9, 9 = sensible)) <sup>[B74, B75]</sup>.

En **République Tchèque**, sur maïs (fourrage et grain), les résultats VCU publiés présentent, pour certains sites, une note de réponse à la sécheresse (*Reakce na sucho [9-1]*). « Elle n'est évaluée qu'en cas d'occurrence. Le degré de flétrissement ou de dessèchement des plantes est indiqué. Niveau 9 Pas d'impact ; 1 Très fort impact. » De plus, une note de réponse au froid (*Reakce na chlad [9-1]*) est également publiée pour les variétés de maïs fourrage, ainsi que pour les variétés de maïs grain très précoces et précoces. « L'évaluation n'est effectuée qu'en cas d'occurrence jusqu'au stade 5 de la feuille développée. Le degré de jaunissement ou de rougissement des plantes est évalué », comme le précise le protocole des tests VCU sur maïs <sup>[B78]</sup>.

Aux **Pays-Bas**, sur maïs fourrage et grain, le protocole VCU mentionne des observations optionnelles des phénomènes de « sensibilité au froid en début d'été » et de « sensibilité à la sécheresse » via l'attribution de notes entre 1 (impact sévère de la sécheresse) et 9 (pas d'impact de la sécheresse) <sup>[B77]</sup>. Cependant, lors des essais post-inscription néerlandais, le document de synthèse de la Liste des variétés recommandées en 2024 mentionne « En particulier, la sécheresse au moment de la floraison cause des dommages au maïs. Une mauvaise formation des grains entraîne une baisse des rendements et surtout une diminution de la valeur fourragère. Les variétés réagissent très différemment au stress de la sécheresse. L'impact de la sécheresse sur les différentes variétés dépend principalement de la durée de la période de sécheresse. La sensibilité à la sécheresse des variétés n'est donc pas reflétée dans une note » <sup>[B82]</sup>.

En **Allemagne**, le protocole des tests VCU sur maïs fait état d'une note entre 1 et 9 à la « sensibilité au froid des jeunes plantes » (*Kälteempfindlichkeit in der Jugend (1 - 9)*). « L'évaluation de la sensibilité au froid des jeunes plantes vise à détecter des dommages encore visibles au début de la croissance longitudinale (BBCH 30) » <sup>[B79]</sup>.

## c. Valorisation des données climatiques

Dans les différents bulletins de résultats d'essais VCU consultés en maïs et en BTH (France, Allemagne, République Tchèque, Belgique, Pays-Bas, Suisse), il n'y a pas d'information relative aux données climatiques rencontrées pendant l'essai, ni sur les stress abiotiques qui ont pu se produire (mis à part les notes spécifiques détaillées dans le paragraphe précédent).

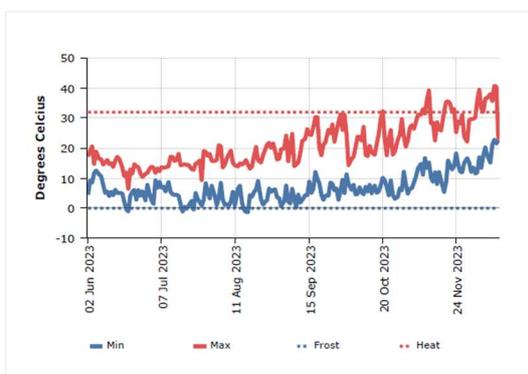
Dans certains pays (République Tchèque et Hongrie), quelques données relatives aux conditions climatiques rencontrées dans les essais post-inscription sont ajoutées aux synthèses, soit par une description du climat de l'année rencontré sur le territoire (République Tchèque) ou la publication des relevés de température et de précipitations mensuelles rencontrées pour chacun des sites d'essais (voir Figure 53).

En **Australie**, le protocole des essais nationaux sur les variétés (NVT) précise que les températures rencontrées en cours de culture doivent faire l'objet de relevés à l'aide de capteurs de températures (capteurs Tinytag) afin d'enregistrer les températures minimales et maximales. En complément, les précipitations mensuelles doivent être renseignées à partir des relevés de pluviométrie, ou à défaut en ayant recours à la station météo la plus proche du lieu de l'essai <sup>[B70]</sup>.

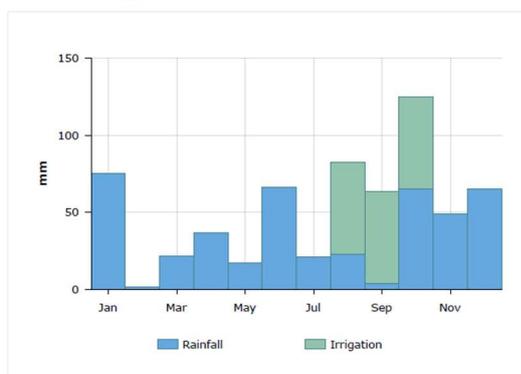
ŐSZI BÚZA MEGFIGYELŐÍV																															
Fajtakísérleti helyszín:		Mosonmagyaróvár			év: 2023																										
Elővetemény: Facélia																															
Talaj típusa: Dunai öntéstalaj																															
Termőréteg (cm): 50																															
Parcella területe		bruttó:		m <sup>2</sup>		nettó: 10 m <sup>2</sup>																									
Humusztartalom (%): 1,96																															
Arany-féle kötöttség (K <sub>a</sub> ): 43																															
pH: 7,33																															
Vetés ideje: 2022.10.07																															
Betakarítás ideje: 2023.07.12																															
Időpontja	N		P		K																										
	ősz	tavaszi	ősz	tavaszi	ősz	tavaszi																									
hatóanyag, kg/ha																															
Műtrágya																															
200 kg/ha, 27% N, 2023.03.01.																															
175 kg/ha, 27% Pétiso, 2023.05.08.																															
Növényvédőszer	Megnevezés		Időpontja		Dózis (kg/ha)																										
	Mustang Forte gyomirtó		2023.03.23		1 l/ha																										
	Wizard rovarölő		2023.04.20		0,2 l/ha																										
	Wizard rovarölő		2023.05.09		0,2 l/ha																										
	Karate Zeon rovarölő		2023.05.22		0,2 l/ha																										
	Tebucor gombaölő		2023.04.20		1 l/ha																										
	Cello gombaölő		2023.05.09		1 l/ha																										
	Cello gombaölő		2023.05.22		1 l/ha																										
Moxa szárszilárdító		2023.04.20		0,4 l/ha																											
Hónap																															
2023																															
2022																															
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12																				
Átlagos havi középhőmérséklet (C°)							3,8					3,5		8,0		9,2		15,1		20,3		23,1				12,7		6,5		2,4	
Havi csapadékösszeg (mm)							65,0					21,2		12,8		75,5		86,1		67,0		28,4				13,6		29,6		56,9	
Öntözés ideje:																															
Öntözés mennyisége (mm):																															
A kísérlettel, adatkieléssel kapcsolatos megjegyzések																															

Figure 53 : Exemple de présentation des données climatiques (températures et précipitations) d'un site d'essai en post-inscription en Hongrie – Source : B84

Temperature Graph



Rainfall and Irrigation Data



Rainfall and Irrigation Data (mm)

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Rainfall	75.0	1.4	21.9	36.8	17.3	66.1	21.1	23.0	3.8	65.0	48.9	64.8
Irrigation	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	60.0	60.0	60.0	0.0	0.0
Total	75.0	1.4	21.9	36.8	17.3	66.1	21.1	83.0	63.8	125.0	48.9	64.8

Rainfall Data Source: BOM Weather Station

Weather Conditions

Event	Comments
Subzero Events	This trial experienced subzero temperatures on the following dates throughout the approximate flowering period: -0.4 °C on Aug 15, -1.2 °C on Aug 16, -1.3 °C on Aug 17. Interpret results with caution.
Plus 32°C Events	This trial experienced high heat conditions on the following dates throughout the approximate flowering period: 32.2 °C on Oct 20. Interpret results with caution.

Figure 54: Extrait des données climatiques (graphiques des températures minimales et maximales ; précipitations et irrigation) d'un site d'essai en post-inscription en Australie – Source : B83

Ces données sont ensuite utilisées pour caractériser les stress thermiques (froids, températures inférieures à 0°C, et chauds, températures supérieures à 32°C) et hydriques rencontrés par les essais, en les incluant dans les rapports de résultats par site, comme présenté sur la **Erreur ! Source du renvoi introuvable**. ci-dessus<sup>[B83]</sup>.

## 2. Réflexions en cours au sein des offices européens

En 2023 s'est tenu le 16<sup>ème</sup> EU-VCU Seminar, qui réunit les différents offices d'examen VATE d'espèces agricoles en Europe.

La question de la résilience à la chaleur et à la sécheresse a été au cœur des échanges car ces stress se rencontrent de plus en plus en Europe dans le contexte de changement climatique, alors même qu'ils sont insuffisamment pris en compte lorsqu'ils se produisent au cours des essais d'inscription des variétés. Une session de travail a eu lieu autour de la problématique « Comment mieux prendre en compte la résilience aux stress thermique et hydrique dans les études VATE ? », déclinée en 4 questions :

- *Qu'est ce qui est déjà fait dans les études VATE actuelles ?*

Certains offices valorisent notamment les interactions GxE en présentant les résultats des essais impactés par ces stress dans des tableaux séparés du reste des analyses

- *Quelles sont les limites des systèmes VATE pour prendre en compte ce sujet ?*

Les limites exposées sont similaires à celles qui ont été remontées via le questionnaire adressé aux sections (confrontation non prévisible aux stress, variabilité des données et exploitation statistique, impossibilité de tester tous les scénarios de stress (intensité, moment du cycle...), manque de caractérisation environnementale des essais...

- *Quelles sont les opportunités pour progresser ?*

Les différentes pistes évoquées sont les suivantes : mieux décrire l'environnement des essais, optimiser les réseaux d'essais pour augmenter les probabilités d'exposition aux stress et mise en place d'essais en conditions contrôlées, développer le continuum pré-inscription / inscription / post-inscription, valoriser la stabilité entre les sites et les années d'essais, développer des outils de phénotypage numérique, développer et utiliser des techniques statistiques alternatives pour valoriser des essais moins précis.

- *Quelles sont les actions communes possibles entre offices d'examen ?*

Il est proposé de travailler à l'harmonisation de protocoles pour évaluer la tolérance vis-à-vis des stress abiotiques, notamment via la mise en place d'un réseau expérimental commun.

Par ailleurs, depuis 2019, le projet européen **INVITE (INnovations in plant Variety Testing in Europe to foster the introduction of new varieties better adapted to varying biotic and abiotic conditions and to more sustainable crop management practices)** a pour objectif d'améliorer l'efficacité de l'évaluation variétale (DHS, VATE) et les informations dont disposent les utilisateurs (sélectionneurs, agriculteurs) sur les performances des variétés dans diverses conditions de production. Il a également pour but d'aider à la valorisation et à la promotion de variétés pour des pratiques agricoles durables et adaptées aux changements du climat. Le projet regroupe 29 partenaires de 13 pays, dont les activités vont de la recherche (Instituts de recherche et universités), à la sélection (8 sélectionneurs représentés dans le consortium) en passant par l'expérimentation (12 offices d'examen dont le GEVES et 10 centres d'expérimentation)<sup>[S31]</sup>. Le projet doit se terminer fin 2024.

### **E. Synthèse du WP3**

Le CS du CTPS a réalisé un état des lieux des avancées des sections sur la prise en compte du changement climatique dans leurs travaux, permettant de souligner les avancées, mais également les difficultés déjà rencontrées dans ce contexte et d'avoir connaissance des craintes, verrous et freins relatifs au changement climatique dans les travaux d'évaluation variétale pour l'inscription au catalogue. Le questionnaire adressé aux sections et commissions inter-sections du CTPS a également été une ressource fort utile pour dessiner des recommandations opérationnelles adaptées à la réalité des réflexions menées par les Sections et commissions inter-sections.

Jusqu'à présent, le changement climatique et les aléas qu'il génère pendant les cycles d'évaluation sont un phénomène que la majorité des sections tentent d'éviter ; peu de sections ont mis en place un pilotage actif afin de se confronter volontairement aux stress abiotiques, et la survenue de ces stress reste peu exploitée et prise en compte dans les analyses DHS ou VATE.

Les difficultés remontées par les sections et commissions inter-sections du CTPS sont de deux natures : les difficultés d'ordre technique (conduite des essais, incidence de la modification de la phénologie, présence de valeurs hors-norme, pression accrue des ravageurs...) et les difficultés méthodologiques (données hétérogènes, données manquantes, analyse statistique pertinente...).

Plusieurs craintes, verrous ou freins ont également été signalés : il peut s'agir de problématiques autour de la durée de l'évaluation, des dispositifs expérimentaux, des exigences statistiques ou encore de la complexité à caractériser ce qui est subi en cours d'essai et à évaluer le comportement des variétés faces aux stress abiotiques ...

Une analyse de la gestion des problématiques relatives au changement climatique par les autres offices d'examen à l'international a permis de mettre en évidence des situations similaires à celle de la France : l'évaluation de la résilience des variétés face à la chaleur ou à la sécheresse fait notamment l'objet de réflexions entre les différents offices européens, tout comme la manière de valoriser les informations relatives aux stress abiotiques.

## WP4 : Comment qualifier le potentiel d'adaptation des variétés au changement climatique ?

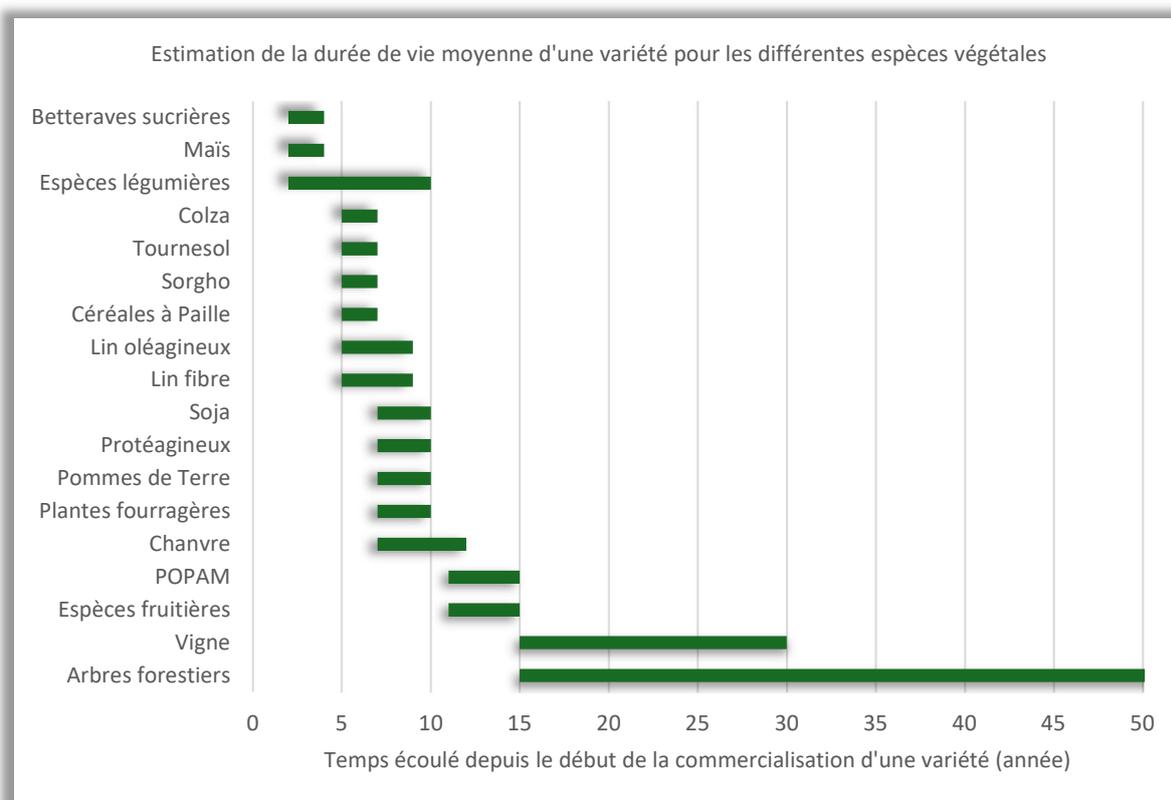
Le changement climatique impacte doublement l'évaluation des variétés dans le cadre de leur inscription au catalogue français. Il s'agit à la fois :

- D'évaluer les variétés malgré un impact croissant du changement climatique sur les procédures d'inscription (accidents climatiques notamment)
- D'évaluer dans quelle mesure une variété a le potentiel de s'adapter aux effets du changement climatique (nouveaux critères d'évaluation, nouveaux lieux d'essais d'anticipation...)

Ce contexte va demander de faire évoluer certaines procédures d'inscription, et ces actions seront d'autant plus urgentes que les espèces évaluées seront menacées par les évolutions climatiques et qu'elles seront en limite de potentiel adaptatif.

### A. Une évaluation à adapter selon la durée de vie des variétés

La trajectoire climatique dans laquelle va s'inscrire une variété nouvellement admise au catalogue est liée au turn-over variétal de chaque espèce, c'est-à-dire de la **vitesse du renouvellement variétal** (voir [Figure 55](#)). Ainsi, il serait pertinent d'évaluer les variétés pour des scénarios climatiques relativement proches pour le maïs ou encore le blé pour lesquels la durée de vie commerciale moyenne d'une variété est courte (4 à 10 ans), et pour des scénarios climatiques lointains pour des espèces telles que la vigne ou les espèces fruitières (quelques dizaines d'années).



**Figure 55** : Estimation de la durée de vie moyenne d'une variété pour les différentes espèces végétales – Réalisation par le CS du CTPS

Les espèces qui possèdent un turn-over variétal lent présentent un marché de petite taille et/ou une biologie lente (espèces pérennes) ; ce sont les espèces qui ont souvent le moins de moyens (financiers, et donc de recherche) mais qui ont le plus de besoins pour s'adapter au changement climatique car

pour ces espèces, la faible vitesse de renouvellement variétal ne permettra pas une adaptation progressive.

A l'inverse, une espèce dont les variétés se renouvellent très vite aura une meilleure capacité d'adaptation par innovation incrémentale, ce qui nécessite une anticipation moindre lors de la création variétale et lors de l'évaluation des variétés au moment de l'inscription au catalogue. Ces vitesses de renouvellement ont une incidence sur la rentabilité de la filière semences et plants, et notamment la rémunération des sélectionneurs, dépendante des formes variétales (hybrides, lignées, variétés populations, variétés synthétiques...) et des facilités de production des semences ou plants (taux de multiplication). Les espèces autogames à faibles taux de reproduction, et/ou avec des surfaces de production réduites et/ou une forte proportion de semences ou plants de ferme sans système de rémunération associé pour le sélectionneur, comme de nombreux protéagineux, sont ainsi moins rentables et moins dynamiques.

Le turnover actuel évoluera peut-être, mais reste un bon indicateur de la dynamique de sélection et du potentiel d'adaptation au changement climatique actuel.

Les impacts et enjeux du changement climatique sur l'inscription des variétés au catalogue et les réponses à mettre en œuvre sont ainsi différentes selon l'espèce considérée : plus le renouvellement sera lent, et moins les investissements en sélection seront forts, et plus l'espèce sera menacée. Chaque section doit donc s'appropriier les spécificités des espèces dont elle a la charge pour adapter les solutions pertinentes pour les différents traits critiques qu'elle doit identifier.

## **B. Evaluer dans un environnement incertain : importance de décrire et caractériser les essais**

### **1. Définitions et cadre de l'envirotypage**

L'envirotypage est un concept qui est apparu au début des années 2010, proposé par Xu<sup>[B85]</sup>. Ce concept repose sur 3 aspects qui sont :

- La mesure de **tous** les facteurs environnementaux qui affectent la culture, et pas seulement les plus importants
- Cette mesure s'effectue au niveau de la parcelle, elle concerne des données locales
- La conduite de la culture et l'ensemble des autres organismes (tels que les adventices, les insectes pollinisateurs, la présence d'animaux dans la parcelle ...) sont inclus en tant que facteurs environnementaux.

Les facteurs environnementaux peuvent être multiples : micro ou macro, biotiques ou abiotiques, internes (température de la plante, pression osmotique, pH intracellulaire...) ou externes. Les facteurs externes peuvent être regroupés en 4 catégories : facteurs climatiques, facteurs du sol, facteurs biotiques et facteurs de conduite de la culture, ce dernier conditionnant fortement les 3 premiers (voir [Figure 56](#)).

Cette caractérisation des environnements d'essais permet de mieux connaître la nature des environnements explorés par les essais multi-locaux et pluri-annuels qui constituent un MET (Multi-Environment Trials), et ainsi d'établir la gamme d'environnements représentés par ce MET, sa représentativité des environnements de cultures actuels et à venir de l'espèce ou encore de structurer le MET en sous-groupes d'environnements homogènes sur lesquels il est possible de produire une information sur l'aptitude de la variété à bien se comporter dans un type d'environnement donné.

Les applications de l'envirotypage sont nombreuses, et on peut notamment utiliser ces informations pour classer des environnements selon leurs similitudes, ou encore définir des « near-iso-environments » (des environnements contrastés sur un seul facteur majeur).

Category	Description	Effects and associated stresses
<b>Climate factors</b>		
Light	Solar radiation, light intensity (elevation, latitude, and season; clouds, dust, smoke, fog and smog), day length (photoperiod)	Most crucial factor for plant growth and development; shading stress
Temperature	Effective accumulated temperature; average, minimum and maximum daily temperatures	Photosynthesis, water and nutrient absorption, transpiration, respiration and enzyme activity, germination, flowering, pollen viability, fruit/seed set, rates of maturation and senescence, yield, quality, harvest duration and shelf life; cold, frost, and heat stresses
Water	Precipitation (rainfall, snow, hail, fog and dew)	Crop productivity and quality; drought, flooding and waterlogging stresses
Air	Atmospheric humidity (relative humidity)	Soil evaporation and plant transpiration; dry air stress
	Wind velocity	Supply of moisture, heat, and fresh CO <sub>2</sub> ; strong wind stress
	Atmospheric gases (CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , N); pollutants (SO <sub>2</sub> , CO, CH <sub>4</sub> )	Air pollution and shading stresses
<b>Soil factors</b>		
Soil type	Soil type (clay, clayey loam, loam, sandy loam, and sand)	Soil's capacity to store water and nutrients, aeration, drainage, and ease of field operations; soil-related stresses
Soil structure	Soil structure (texture, soil sealing, erosion, contamination, compaction, hydro-geological risks)	Crop productivity and quality contributed by soil fertility, organic matter and soil biodiversity; soil-borne stresses
Soil components	Soil moisture	Crop productivity and quality; drought, flooding and waterlogging stresses
	Soil air	Water absorption, respiration of roots and micro organisms, nutrient availability, decomposition of organic matter; soil air stresses including O <sub>2</sub> limitation
	Soil temperature	Soil physical and chemical processes, absorption of water and nutrients, germination of seeds and growth rate, microbial activity and processes in the nutrient availability; cold and heat soil stresses
	Soil pH	Nutrient availability and microorganism activities; acidic, saline and alkaline soil stresses
	Soil fertility (N, P, K, micronutrients/mineral and soil organic matters)	Plant nutrients and their balance for plant growth; nutrient deficiency stresses and nutrient use efficiency
	Soil salinity (electrical conductivity)	Osmotic tension and water uptake; salinity stress
<b>Biotic factors</b>		
Companion animals	Soil fauna (protozoa, nematode, snails, and insects)	Decomposition of raw organic matter, fixation of atmospheric nitrogen; damages to plant roots and other parts
	Animals around plants (pest insects, parasites, fungi, bacteria, viruses, predators, honey bees, wasps, human)	Cross-pollination and increasing yield, damage to crop yield; various abiotic stresses
Companion plants	Weeds, epiphytic and allelopathic plants	Competition for space, water, light and nutrients, mutual benefit (synergistic effect), interference with crop plants, releasing compounds, volatilization or decomposition of plant residues, inhibition or prevention of plant growth; various biotic stresses
<b>Cropping system</b>		
Intercropping	Companion crop(s)	Competition for space, water, light and nutrients, buffering and mutual benefit (synergistic effect); various biotic stresses
Rotating cropping	Fore-rotating crop(s)	Residual effects of agronomic practices from the fore-rotating crop; various biotic stresses

**Figure 56** : Facteurs environnementaux pouvant affecter le développement de la culture et le rendement – Source : B85

## 2. Mieux caractériser l'environnement pour mieux interpréter les essais variétaux soumis à des aléas

Par définition, l'aléa est un événement non prévisible, dont la survenue ne peut être anticipée. Néanmoins, dans le cadre du changement climatique, la probabilité de survenue en culture d'événements extrêmes liés au changement climatique est accrue, et les essais d'inscription des variétés vont y être de plus en plus souvent confrontés. C'est d'ailleurs l'un des points d'inquiétude qui a été remonté par les sections du CTPS (voir chapitre 3).

Actuellement, il n'y a que très peu d'information exploitée quand survient un aléa, principalement parce qu'il est difficile de caractériser ce que l'essai subit ; il est alors possible que l'essai ou les essais marqués par de tels aléas soient écartés au moment de la validation des essais.

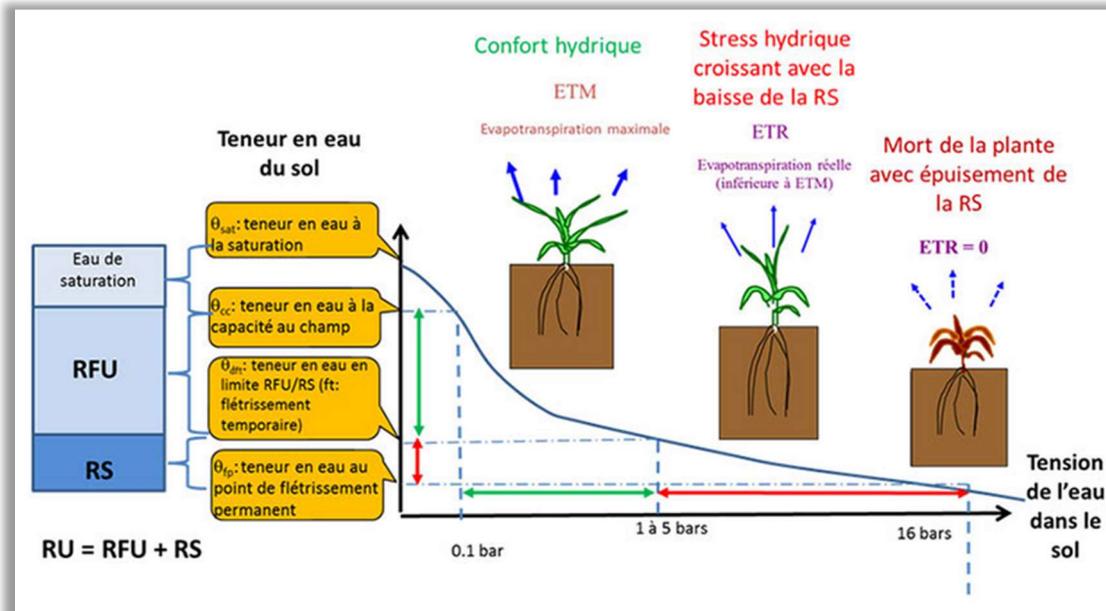
Or, l'envirotypage est une manière de caractériser les aléas auxquels les cultures font face, et notamment leur composante abiotique (température, rayonnement, déficit hydrique, vent ...).

Par ailleurs, le rendement est un caractère fondamentalement intégratif, c'est-à-dire qui reflète les différentes conditions auxquelles la plante a été confrontée au cours de sa croissance (itinéraire technique, aléas climatiques ...). Il permet donc d'analyser un stress subi consécutif à un aléa, à la

condition d'avoir caractérisé ce qui a été subi par la plante. Par exemple, en cas de survenue de bactériose sur une culture, le suivi de l'incidence de la maladie permet de relier les rendements au degré de résistance/tolérance des variétés.

Les données fournies par les stations météorologiques les plus proches des essais donnent une première idée des conditions rencontrées par les plantes au cours de l'essai (températures minimales et maximales, pluviométrie...) mais elles peuvent toutefois se révéler incomplètes et imprécises car certains aléas sont très localisés (orage, grêle ...).

Il est possible d'équiper les parcelles de leur propre station météo afin de récolter des données au plus proche des essais.



**Figure 57** : Relations entre la teneur en eau du sol, la tension de l'eau dans le sol et le statut hydrique d'une culture. RU = Réserve Utile en eau ; RFU : Réserve facilement utilisable ; RS : Réserve de Survie – Source : S32

La caractérisation de la Réserve Utile en eau du sol (RU) est également un élément très important à prendre en compte pour la détermination de stress hydrique (voir [Figure 57](#)). Il existe plusieurs méthodes d'estimation du RU, qui nécessitent des données plus ou moins aisées à obtenir (la plus simple est associée au type de sol, la plus complexe est basée sur des prélèvements et des mesures à réaliser sur le terrain et en laboratoire). Une quantification précise et localisée requiert donc un certain investissement : elle est nettement plus facile à envisager pour les sites d'essais récurrents et doit y être mise en œuvre en priorité<sup>[B86]</sup>.

Plusieurs études recensent par ailleurs des capteurs pour suivre l'état hydrique du sol ou évaluer le niveau de stress hydrique des cultures<sup>[B87, B88]</sup>. L'idée de caractériser l'état du milieu par l'état de la culture pour différents génotypes communs et connus (génotypes révélateurs) peut faire appel à différents capteurs basés sur un ensemble de technologies, comme par exemple la télédétection dans le proche infrarouge ou via des analyses multispectrales, permettant ainsi une acquisition combinée de données provenant de plusieurs sources pour analyser simultanément plusieurs réponses à différents stress, avec toutefois des limites d'interprétabilité au-delà de chaque site, donc pour les synthèses à l'échelle de réseaux<sup>[B89]</sup>.

Le CS du CTPS propose de considérer la survenue d'un aléa comme un événement d'intérêt, informatif. Il est possible d'affecter un coefficient à un essai qui rencontre un stress / aléa donné, dépendant de sa probabilité d'occurrence dans le futur, en fonction de la durée de vie des variétés de l'espèce considérée. Toutefois, si on ne minimise pas le poids des aléas rares, cela permet de faire rentrer dans

le catalogue, de manière opportuniste, des variétés qui se comportent bien vis-à-vis d'un stress ou d'une combinaison de stress donnés. Cependant, il paraît problématique de pénaliser des variétés qui auraient pu être inscrites si l'aléa n'était pas survenu.

La solution envisagée pourrait ainsi consister à rééquilibrer le poids qui est actuellement donné à la moyenne dans la cotation des variétés, en ajoutant par exemple un bonus d'inscription pour les variétés ayant montré une tolérance significativement accrue, en regard des témoins, à un aléa rencontré. Une information transparente des utilisateurs sur la nature des stress rencontrés et la réponse de variétés particulières est alors essentielle.

### 3. L'apport des outils de modélisation pour caractériser les environnements d'essai

Un modèle de culture simule souvent de façon dynamique la croissance et le développement d'un couvert en fonction des ressources et stress du milieu : ces modèles de culture sont des modèles dits « explicatifs » (par opposition aux modèles descriptifs).

Les modèles de culture permettent notamment de prédire le rendement d'une culture à partir de la simulation journalière du fonctionnement du peuplement en tenant compte des conditions environnementales et des propriétés intrinsèques des plantes<sup>[C3]</sup>.

Le recours aux modèles de culture pour des diagnostics agronomiques permet une meilleure caractérisation des environnements et donc une meilleure connaissance des réseaux d'essais.

En effet, les modèles de culture sont utiles pour simuler dynamiquement l'évolution des ressources du sol (eau et azote principalement) ainsi que la croissance des plantes, ce qui permet par exemple d'identifier le moment et l'intensité des stress hydriques ou encore des déficits en azote.

De plus, les modèles de culture, en caractérisant finement et de façon dynamique plusieurs stress abiotiques, permettent de catégoriser les essais selon la dynamique des stress qui s'y expriment. C'est par exemple ce qui a été fait en utilisant le modèle de culture SUNFLO sur tournesol, qui a permis de définir différentes typologies de stress hydrique en fonction du moment d'occurrence du stress (phase végétative, floraison, maturation) et de son intensité<sup>[B90]</sup>. Une connaissance précise du RU est nécessaire en entrée des modèles de culture pour simuler l'état hydrique du sol et son effet sur l'élaboration du rendement associé à la réponse variétale<sup>[B86]</sup>.

Il y a cependant des limites à l'utilisation des modèles de culture pour les caractérisations de l'environnement<sup>[B90]</sup> :

- L'analyse du comportement du modèle est difficile et complexe, leur développement est souvent long, nécessitant plusieurs types de compétences, et seuls les effets connus peuvent être reproduits ;
- La difficulté dans la collecte des informations nécessaires (caractéristiques du sol, données météorologiques) ;
- Des protocoles d'acquisition de données nécessitant du temps et/ou de la main d'œuvre ;
- La durée d'analyse des données, souvent réalisée *a posteriori* alors que les périodes d'analyse des résultats en vue de l'inscription des variétés sont contraintes dans le temps ;
- Les modèles ne sont pas toujours complets quant à la liste des stress / aléas qui peuvent survenir, ne permettant pas une caractérisation exhaustive des conditions d'essai ;
- Les modèles de croissance sont élaborés sur un petit nombre de variétés, voire une variété de référence. Ils pourront alors se révéler moins pertinents pour des variétés nouvelles présentant des caractéristiques originales et être mis en défaut, ce qui nécessite des corrections, des ajustements et des évolutions pour refléter les nouvelles données.

Une meilleure caractérisation des conditions environnementales des essais permet ainsi l'ajout de covariables dans les analyses statistiques des essais, ce qui enrichit l'analyse des interactions GxE<sup>[B90]</sup>. Pour aller plus loin, dans leur article, Tolhurst *et al.*<sup>[B91]</sup> proposent l'utilisation d'un modèle linéaire mixte à analyse factorielle intégrée (integrated factor analytic linear mixed model (IFA-LMM)) permettant ainsi de capturer :

- les interactions GxE **prédictibles** via les covariables connues (covariables génétiques dérivées des marqueurs génétiques et covariables environnementales issues des données météorologiques et du sol)
- les interactions GxE **observées** via les covariables latentes (covariables estimées directement à partir des données phénotypiques)

#### 4. Comment gérer les données manquantes et les plans incomplets ?

Le projet OPTIRES (**OPT**imiser les **RE**seaux d'essais variétés par des méthodes permettant, en particulier, de mieux contrôler l'hétérogénéité spatiale dans un essai) a été mené entre 2016 et 2021 et avait pour objectif de faire évoluer les procédures de traitement des données des réseaux d'essais des variétés en :

- Améliorant la précision de chacun des essais en situations hétérogènes (via des analyses spatiales, ou par l'utilisation de covariables décrivant l'hétérogénéité du milieu)
- Augmentant le nombre d'essais valorisés dans les regroupements (par la prise en compte des essais à variété(s) manquante(s), ou par l'introduction d'essais moins précis)

Pour le 1<sup>er</sup> axe du projet, l'ajout d'une covariable en cas de variabilité dont la cause est identifiée sur l'ensemble d'un essai, ou l'utilisation d'une modélisation spatiale des résidus lorsque la cause est inconnue, sont **en cours de mise en œuvre** dans les chaînes d'analyses du GEVES.

Le 2<sup>ème</sup> axe du projet a permis de mettre en évidence que « **la présence de données manquantes dans les réseaux d'essais semble tout à fait acceptable, si le nombre de données manquantes est raisonnable** », car les méthodes d'estimation utilisées sont robustes. Il n'est donc pas nécessaire de tenter d'imputer les données manquantes, c'est-à-dire de tenter de combler les trous par les prédictions des performances de variétés manquantes sur certains essais. Le modèle mixte, avec éventuellement une pondération, doit permettre de contrôler ce défaut de données.

Il est toutefois à noter que :

- Les réseaux de petite taille tolèrent moins les données manquantes,
- Les réseaux présentant de forts niveaux d'interaction GxE tolèrent moins les données manquantes,
- Les réseaux pour lesquels les données manquantes sont localisées sur les essais les plus atypiques seront plus perturbés.

Il est important, particulièrement en cas de données manquantes, d'associer à une moyenne variétale une valeur de précision d'estimation. Cette précision d'estimation quantitative rend compte des représentations déséquilibrées des variétés dans le réseau et est une information indispensable à la bonne compréhension des résultats. Elle peut être affichée de différentes façons : sous forme d'intervalle de confiance ou d'erreur type dans un tableau chiffré, ou de barres d'erreurs sur un graphique.

A ce jour, l'arrêt de l'exclusion systématique d'un essai en cas de données manquantes doit encore être validé dans chacune des sections CTPS. Il convient de modifier cette situation et, a contrario, de chercher à extraire le maximum d'informations de tels essais, en particulier si les données manquantes sont liées à des conditions particulières liées au changement climatique.

Avec ces approches, le CS du CTPS souligne que l'on est en décalage avec la réalité des effets du changement climatique : en éliminant des sites avec de plus fortes variabilités résiduelles et données manquantes, généralement liées à des situations de stress, on se trouve plutôt dans une posture qui aboutit de facto à « lisser » les hétérogénéités et conserver des conditions de production plus favorables.

### C. Place du continuum pré-inscription / inscription / post-inscription

La variabilité climatique interannuelle et l'impact des conditions annuelles sur les résultats des essais d'inscription soulèvent l'intérêt de réfléchir en termes de **séries temporelles**, en utilisant le maximum de données disponibles sur le plus long pas de temps possible. Ainsi, les résultats d'une année donnée peuvent être révélateurs du potentiel de la variété soit dans un scénario court-terme, soit dans un scénario long-terme (soit, dans certains cas, de conditions passées qui ne se reproduiront que rarement dans le futur). Ainsi il est intéressant de réfléchir à la façon de collecter et utiliser les informations variétales acquises par les sélectionneurs, pour les lier ensuite à celles produites lors de l'inscription, puis post-inscription.

#### 1. Utilisation de données pré-inscription par le déposant

Le temps long de la sélection constitue une opportunité d'acquérir de l'information : en effet, la probabilité d'occurrence de divers aléas sur les différents lieux et au cours des années successives de sélection est plus élevée que pendant les deux ou trois années d'essais CTPS. Il semble donc pertinent de capitaliser sur les années d'essais pré-inscription pour étudier l'adaptation des variétés candidates à l'inscription au changement climatique, et ce d'autant plus que, *de facto*, les candidates en développement qui sont gardées à l'issue des années de tests chez les obtenteurs ont de fortes probabilités de présenter des comportements intéressants vis-à-vis des scénarii climatiques rencontrés lors de ces années (dans le cas contraire, la candidate aura probablement été éliminée, soit parce que la plante n'a pas survécu, soit parce qu'elle a été écartée par le sélectionneur).

La plupart des entreprises de sélection ont accès à des zones d'essai hors de l'Hexagone, ce qui leur permet de multiplier les conditions environnementales de tests, et ainsi de repérer des adaptations intéressantes dans le cadre du changement climatique. Ainsi le déposant peut utiliser ses données pour démontrer, dans des conditions particulières, les caractéristiques adaptatives spécifiques de sa variété, caractéristiques difficiles à mettre en œuvre au sein du Réseau National d'Essais (RNE).

Afin que le système soit équitable entre tous les obtenteurs, il faut que les exigences soient atteignables par tous, sans rogner sur ce qui est strictement nécessaire pour maintenir le rôle de tiers de confiance du CTPS.

#### 2. Standardiser le recueil de données

Afin d'accepter les données du déposant dans le cadre de l'inscription, il est nécessaire de définir un cahier des charges encadrant ces essais. Il est également nécessaire de s'assurer de garantir l'accès à l'ensemble des essais qui ont été réalisés, que ceux-ci soient, ou non, favorables à la variété en cours d'inscription.

Le CS estime qu'il faudrait *a minima* récupérer les informations suivantes pour chacun des essais menés par le déposant :

- Le plan d'essai
- La liste des variétés témoins (si possible, inclure un témoin CTPS)
- L'itinéraire technique et les cultures précédentes
- Les caractéristiques du sol (notamment les reliquats azotés)
- Les données météorologiques (température, pluviométrie, ensoleillement)

Pour cela, il faut que le déposant déclare *ex ante* ses dispositifs et les itinéraires techniques associés, sans communiquer sur les génétiques testées, et le CTPS récupérera ces informations en cas de dépôt d'une variété candidate à l'inscription.

### 3. Exploitation des données du déposant

Le CS du CTPS propose de renforcer le rôle de la Commission de Validation des Essais (CVE) qui pourra identifier ce que les essais du déposant peuvent apporter comme information complémentaire sur l'adaptation au changement climatique, l'objectif étant que les experts de la CVE évaluent si les essais sont représentatifs et informatifs quant aux climats futurs que la variété pourrait rencontrer pendant la durée de sa commercialisation. Il serait possible, à partir de la caractérisation des essais, de situer les essais de l'obteneur par rapport à ceux du RNE et ainsi mesurer leur spécificité/originalité, ou au contraire mesurer si les résultats observés sur cet essai viennent confirmer ceux obtenus sur des essais aux environnements de culture proches.

La question de l'égalité de traitement entre les obtenteurs se pose, car tous ne rencontreront pas les mêmes stress au cours de leur process de sélection.

Pour valoriser les connaissances acquises sur les variétés, et la présence de certaines adaptations, il sera essentiel d'adapter la communication et donner accès à ces informations, pour que les utilisateurs puissent orienter en conséquence les évaluations variétales dans leurs réseaux d'essai, puis leur déploiement/commercialisation.

#### **D. Adaptation des règles d'inscription des variétés dans le contexte du changement climatique**

##### 1. Rappel sur l'inscription des variétés

L'inscription au catalogue officiel français est intégrée dans la réglementation « Variétés, Semences & Plants » dont l'objectif historique est de garantir à l'utilisateur une semence ou un plant sain(e), loyal(e) et marchand(e). Le CTPS accompagne et oriente l'innovation variétale en faisant évoluer ses règlements techniques d'inscription, où sont définies les règles de décision qui visent à la meilleure adéquation entre les objectifs des utilisateurs de variétés, les attentes de la société civile et les orientations des pouvoirs publics, tout en intégrant l'expertise des sélectionneurs.

L'évaluation d'une variété pour son inscription au catalogue officiel se fait sur les épreuves de DHS (Distinction, Homogénéité, Stabilité), complétées pour les espèces agricoles et la vigne des épreuves de VATE (Valeur agronomique, technologique et environnementale) <sup>[S33]</sup>.

Les études DHS permettent de vérifier que la variété est Distincte des variétés notoirement connues, Homogène et Stable, c'est à dire qu'elle conserve ses caractéristiques phénotypiques de génération en génération. Conduites avec des protocoles harmonisés au niveau européen, sur du matériel végétal fourni par le déposant, ces études apportent une description de la variété qui permet de l'identifier. Cette description et le matériel végétal fourni sont à la base de la certification des semences et plants et de la protection des droits de l'obteneur <sup>[S34]</sup>.

Les études VATE permettent de décrire la valeur culturelle de la variété dans les principaux contextes pédoclimatiques qu'elle rencontrera en France ainsi que la valeur d'usage des produits de récolte issus de la variété. Ces études sont menées dans un réseau d'essais qui couvre la gamme des environnements que pourra rencontrer la variété, et qui recoupe de façon générale l'aire de culture actuelle de l'espèce.

Pour être proposée à l'inscription, la variété nouvelle doit apporter un progrès par rapport aux variétés actuelles : elle est donc comparée à des témoins références du marché. Les règles d'admission VATE, qui tiennent compte d'un certain nombre de critères, sont formalisées par des commissions d'experts du CTPS et sont publiées dans les règlements techniques. Elles ne sont pas figées dans le temps mais sont en évolution constante pour mieux répondre aux attentes des utilisateurs et de la société, en tenant compte des avancées de la sélection <sup>[S33, S34]</sup>.

## 2. Posture du CTPS : informer ou orienter ?

Face aux enjeux induits par le changement climatique, le CS du CTPS conseille de renforcer le rôle d'orientation du CTPS. Pour cela, il faut adopter une posture volontariste pour se placer dans des conditions qui vont être représentatives du futur climat que pourrait connaître la variété candidate, et valoriser et capitaliser sur les aléas qui peuvent être rencontrés sur les différents sites et années d'essais. Néanmoins, le CS du CTPS rappelle qu'on ne cherche pas uniquement à évaluer la réponse de l'adaptation des variétés au changement climatique dans le cadre de l'inscription au catalogue. C'est pourquoi il est proposé d'inclure, dans le réseau d'essais, un site déporté qui soit représentatif du climat futur projeté (au pas de temps pertinent, cf. chapitre 4, A), afin d'avoir une première évaluation dans un climat plus contraignant, sans pour autant mettre en difficulté les variétés candidates qui continueront à être évaluées également au regard du climat actuel.

### **Tester les variétés dans un site miroir : exemple de la démarche des arbres forestiers**

Cette approche s'inspire du projet ESPERANCE<sup>[B92]</sup>, qui porte sur la création d'un réseau d'expérimentations permettant d'identifier rapidement et collectivement le matériel génétique du futur pour les arbres forestiers.

En effet, la trajectoire climatique prise ces dernières années, l'ampleur des impacts et la durée de rotation des essences impliquent une réaction rapide et appropriée des gestionnaires forestiers. Le savoir-faire et les méthodes sylvicoles ne vont pas suffire pour maintenir des peuplements productifs. Il est donc devenu crucial d'anticiper en proposant dès aujourd'hui des options d'adaptation raisonnées et innovantes à partir des connaissances existantes. Les gestionnaires sont en attente de recommandations pour la conduite et le renouvellement de leurs peuplements forestiers.

L'évaluation de nouvelles essences se fait en trois étapes :

- Le test d'élimination, qui a pour objectif de sélectionner rapidement (+/- 10 ans) des essences peu ou pas connues, parmi un grand nombre, sur des bons sols et selon les enjeux
- Le test de comportement, qui a pour objectif d'évaluer à moyen terme (30 ans) le comportement d'essences / provenances d'intérêt potentiel sur des sols différents mais représentatifs au sein d'une région.
- Le test en îlot d'avenir, qui a pour objectif d'apprivoiser une nouvelle essence / provenance sur la durée de vie du peuplement

La particularité du réseau ESPERANCE est de proposer l'utilisation de « sites miroirs » (voir [Figure 58](#)), qui correspondent à l'analogue pédoclimatique d'une sylvoécórégion (SER) donnée pour un futur climatique déterminé. Un site miroir est un site expérimental en tout point identique à celui qui est installé dans la zone à enjeux (rouge), mais installé dans la zone analogue climatique (bleue) de la zone à enjeux étudiée. La difficulté majeure pour l'installation de ces sites miroir est de trouver un site « analogue » avec un sol proche de celui du site « zone à enjeux », afin de ne pas introduire un biais sol entre les 2 dispositifs.



**Figure 58** : Exemple d'analogue climatique d'une sylvoécórégion (en rouge) déterminé pour un climat futur en 2050 (en bleu) – *Source : B92*

L'ajout de bonus dans les règles d'inscription constitue un levier possible pour orienter / encourager l'inscription de variétés avec des caractéristiques particulières et permet d'identifier une cible claire que l'on souhaite atteindre, comme cela a pu être le cas récemment avec le bonus pour la résistance à la cercosporiose sur betterave sucrière. Ces critères permettent d'orienter le progrès génétique et sont donc vertueux. L'attribution de bonus dans le cadre du changement climatique est proposée par les membres du CS du CTPS. Outre l'effet direct des bonus, qui peut parfois s'avérer limité, ils permettent de mettre en exergue une ou plusieurs spécificités des variétés. Jusqu'à présent, le comportement moyen sur l'ensemble du réseau prime, mais des évolutions récentes permettent de valoriser des adaptations à des sites du réseau, et de mieux valoriser les résistances à certains stress. Dans le cas présent, ces bonus permettraient de souligner l'adaptation à certaines composantes du changement climatique que le lieu représentatif du climat projeté aurait permis de mettre en évidence.

### 3. La confrontation volontaire à certains stress : possibilité de mise en œuvre dans le réseau CTPS

Afin d'étudier le comportement au froid de certaines espèces (blé tendre d'hiver, orge d'hiver, triticale, avoine d'hiver, pois d'hiver, féverole d'hiver), des tests spécifiques sont réalisés sur la station INRAE de Chau-des-Prés, dans le Jura. Les températures hivernales peuvent atteindre les -35°C sous abri. Plusieurs observations sont effectuées (date de levée, peuplement à la levée, dégâts foliaires, taux de survie hivernale) <sup>[B81]</sup> et synthétisées en une note variétale. Ce dispositif a permis de sécuriser le comportement du blé d'hiver, et a surtout permis à plusieurs espèces dont le type printemps est dominant de se développer en type hiver : l'orge d'hiver est à ce titre une grande « success story » française, et les protéagineux d'hiver, bien qu'actuellement confrontés à d'autres difficultés (biotiques), constituent aujourd'hui un des leviers clés d'adaptation au changement climatique par l'évitement de stress de fin de cycle qu'ils permettent <sup>[B15]</sup>.

Il s'agit aujourd'hui du seul stress abiotique sur lequel des investissements significatifs ont été réalisés pour la VATE : de tels essais avec une confrontation volontaire à un stress abiotique nécessitent un investissement spécifique en moyens matériels (ici des toits mobiles permettant de gérer le couvert neigeux) et humains (gestion opérationnelle du site et compétences techniques pour les observations), sur un site aux caractéristiques agroclimatiques particulières.

Les acteurs n'arrivent plus à assumer ces investissements très importants, conduisant à une mise en vente programmée du site, alors qu'on serait tentés de vouloir démultiplier ce type de démarche pour d'autres stress et que des infrastructures existent déjà chez les différents partenaires de l'évaluation variétale, ou chez des offices d'examen européens homologues du GEVES.

Ce cas particulier nous livre quelques enseignements clés. Il démontre l'efficacité d'un site dédié en VATE, qui a permis de faire évoluer fortement les caractéristiques des variétés inscrites, en incitant les sélectionneurs à utiliser le site pour évaluer leur matériel végétal en amont même des épreuves d'inscription, contribuant ainsi à l'équilibre économique du dispositif. Il permet aussi de prendre conscience des difficultés à faire perdurer un site ciblant un stress abiotique dans un contexte de climat changeant. Le cas est d'ailleurs particulièrement paradoxal : le risque de gel tendrait à diminuer sous effet du changement climatique, mais le passage à un type hiver reste une des meilleures pistes d'adaptation au changement climatique, et la sécurisation du comportement de ce type de phénologie reste une inquiétude légitime à traiter.

Au bilan, ce dispositif mériterait un retour d'expérience plus complet, pour aider à façonner non seulement des dispositifs visant à traiter l'évaluation face aux stress abiotiques, mais aussi l'organisation collective nécessaire à leur fonctionnement et leur pérennité.

#### 4. Sécuriser ou décrire les environnements stressés ?

Les études DHS ont pour objectif de vérifier qu'une nouvelle variété est Distincte des variétés notoirement connues, Homogène et Stable de génération en génération. L'examen aboutit à une description de la variété, à l'aide de caractères pertinents<sup>[S33]</sup>.

Les essais de distinction peuvent se baser sur le calcul de la distance morphologique de la nouvelle variété candidate à l'inscription avec les variétés Témoins issues de la collection de référence. Le dispositif est complété par un set de variétés Exemples, commun à tous les offices d'une zone géographique donnée, qui sert d'étalon dans l'attribution des notes.

Etant donné que les aléas climatiques peuvent modifier les gammes de variation (« tasser » les valeurs ou au contraire augmenter les gammes de variation) des observations morphologiques (floraison en cas d'à-coup thermique par exemple), il faut s'assurer de pouvoir adapter la distance morphologique minimale, sans prendre de risques, aux conditions de l'année, c'est-à-dire transformer la mesure brute d'un caractère en note relative aux variétés Exemples.

Selon les responsables des études DHS au GEVES, les standards établis par l'OCVV (Office communautaire des variétés végétales) indiquent qu'il faut que les essais DHS soient menés dans des conditions optimales ; l'OCVV encourage donc à protéger les essais (utilisation de filets anti-grêle, bougies antigel...) pour « faire aussi bien que l'industrie face aux aléas climatiques ».

Par ailleurs, pour les espèces qui ne sont soumises qu'à l'évaluation DHS (pas de VATE), il semble possible de capitaliser de l'information sur certains traits relatifs à l'adaptation au changement climatique (épaisseur des feuilles, rugosité des feuilles, type de port...). Ceci pourrait également être envisagé pour les espèces à VATE.

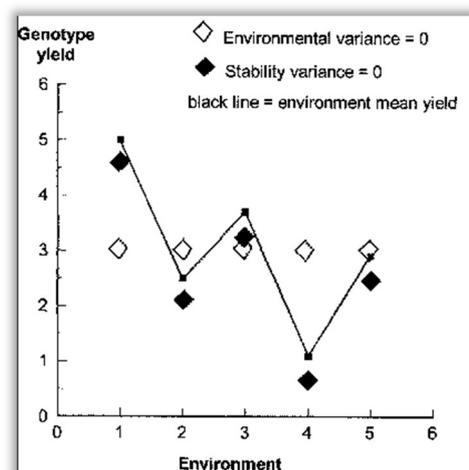
#### 5. De la performance moyenne à la stabilité des variétés

Il existe plusieurs indicateurs d'intérêt pour évaluer le rendement des variétés, parmi lesquels on retrouve :

- La performance globale : réponse moyenne du génotype dans l'ensemble des environnements
- La réactivité (*responsiveness*) : réponse spécifique du génotype aux facteurs environnementaux
- La stabilité : variabilité de la réponse du génotype dans l'ensemble des environnements

La notion de stabilité recouvre plusieurs définitions (voir Figure 59). On peut parler de<sup>[S35]</sup> :

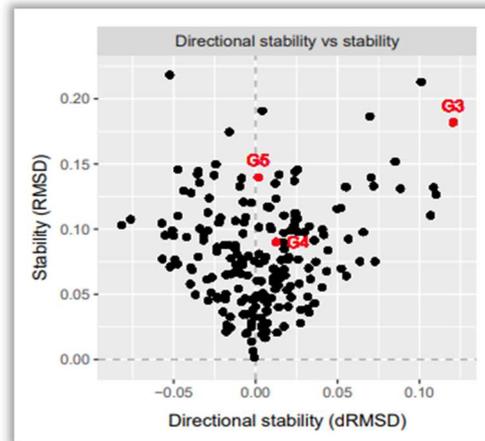
- **Stabilité dynamique** : Une variété stable selon le concept de stabilité dynamique aura une performance relative (e.g. l'écart entre son rendement et le rendement moyen de variétés témoins) qui varie peu entre essais. Cette stabilité donne la même importance à l'ensemble des environnements, qu'ils soient favorables ou non, et permet d'identifier des variétés dont la réponse aux différents environnements d'essais est proche de celle des variétés témoins.



**Figure 59:** Illustration, pour 1 variété donnée, des concepts de stabilité statique (losange blanc) et de stabilité dynamique (losange noir) par rapport au rendement moyen d'un ensemble de variétés dans chaque environnement donné – Source : S35

- **Stabilité statique** : Une variété stable selon le concept de stabilité statique présente une performance (e.g. un rendement) qui varie peu entre essais. Cette variété sera donc mieux adaptée aux environnements défavorables à faible potentiel de production et moins bien adaptée aux environnements favorables à fort potentiel de production.

Récemment, Tolhurst propose d'introduire la notion de **stabilité directionnelle**, définie comme la différence de variabilité au-dessus et au-dessous de la réponse moyenne du génotype. Une valeur positive indique une forte probabilité d'adaptation spécifique (comme c'est le cas pour le génotype G3 dans la [Figure 60](#)), ce que ne permettent pas forcément d'identifier les mesures de stabilité conventionnelle <sup>[B93]</sup>.



**Figure 60** : Illustration de l'intérêt de la notion de stabilité directionnelle pour identifier une probabilité de forte adaptation spécifique – Source : B93

Dans le cadre de l'inscription des variétés, la stabilité n'est pas aujourd'hui un critère pour la cotation des variétés. Par ailleurs, l'expression fréquente des performances variétales en pourcentage de la valeur de variétés témoins tend à donner la même importance à chaque essai du réseau pour la cotation des variétés, ce qui fait écho au concept de stabilité dynamique. Toutefois cette pondération équitable entre essais mériterait d'être mise en débat selon l'objectif que l'on donne aux variétés dans un contexte de changement climatique : limiter les pertes de rendement des années défavorables ou au contraire compenser les pertes les années défavorables par des gains suffisants les années favorables.

## 6. Intégrer l'évaluation de nouveaux critères pour mieux caractériser l'adaptation au changement climatique

### a. Besoins exprimés par les sections

Dans le questionnaire adressé aux sections et inter-sections du CTPS, une question portait sur le besoin d'intégrer de nouveaux critères pour caractériser l'adaptation au changement climatique. Les réponses ont été compilées dans le Tableau 9.

Les critères de « tolérance à la sécheresse », « efficacité de l'eau », « tolérance à la chaleur » et « aptitude au semis précoce » sont les critères liés aux stress abiotiques qui sont cités par le plus de sections et inter-sections ; viennent ensuite les critères liés aux stress biotiques, notamment « résistance aux ravageurs » et « résistance aux maladies ».

On peut noter que certains critères pourraient faire l'objet d'une première évaluation dans le cadre de l'essai implanté dans un analogue climatique (cf. 2. Posture du CTPS : informer ou orienter ?). En effet, l'analogue climatique sera, par définition, situé dans une zone où la probabilité de rencontrer des conditions chaudes et sèches est plus importante.

**Tableau 9 :** Besoins de nouveaux critères identifiés par les sections et inter-sections du CTPS pour permettre l'évaluation de l'adaptation des variétés au changement climatique

Besoin nouveaux critères	Céréales	Sorgho	Maïs	Vigne	Tournesol	Soja	Betterave sucrière	CISPS	Pomme de terre	Chanvre	Lin fibre	Lin oléagineux	Plantes protéagineuses	Colza	Plantes fourragères et à ratoon	Total
Tolérance à la sécheresse	x		x	x			x		x	x	x	x	x	x		10
Efficacité de l'utilisation de l'eau	x	x	x				x		x	x				x	x	8
Tolérance à la chaleur			x	x			x		x	x	x	x	x			8
Aptitude au semis précoce	x	x	x		x		x								x	6
Résistances aux ravageurs							x	x			x		x	x		5
Résistance aux maladies	x						x	x					x	x		5
Vigueur au stade précoce			x		x		x						x	x		5
Absorption minérale (N, P, K)	x						x	x		x					x	5
Architecture racinaire		x			x			x		x						4
Résistance au gel tardif				x									x		x	3
Maintien de la qualité des produits										x				x	x	3
Capacité à rester vert					x		x	x								3
Amélioration du potentiel de rendement			x												x	2
Modification de la composition des récoltes (sucres, protéines ... à préciser)								x		x						2
Aptitude à la culture en mélange														x	x	2
Aptitude au semis tardif														x	x	2
Maturité précoce	x															1
Résistance au gel								x								1
Besoins en °C/J									x							1
Maturité tardive	x															1
Sensibilité à la photopériode															x	1
Floraison précoce								x								1
Floraison tardive								x								1
Amélioration du stockage et de la remobilisation du glucose										x						1
Durée de la floraison												x				1
Capacité à germer / à lever en conditions très sèches								x								1

Il appartient ainsi à chaque section de définir les informations / critères qu'elle souhaite évaluer dans l'essai d'analogie climatique pour répondre, au moins partiellement, à ce besoin de nouveaux critères identifiés lors de la complétion du questionnaire.

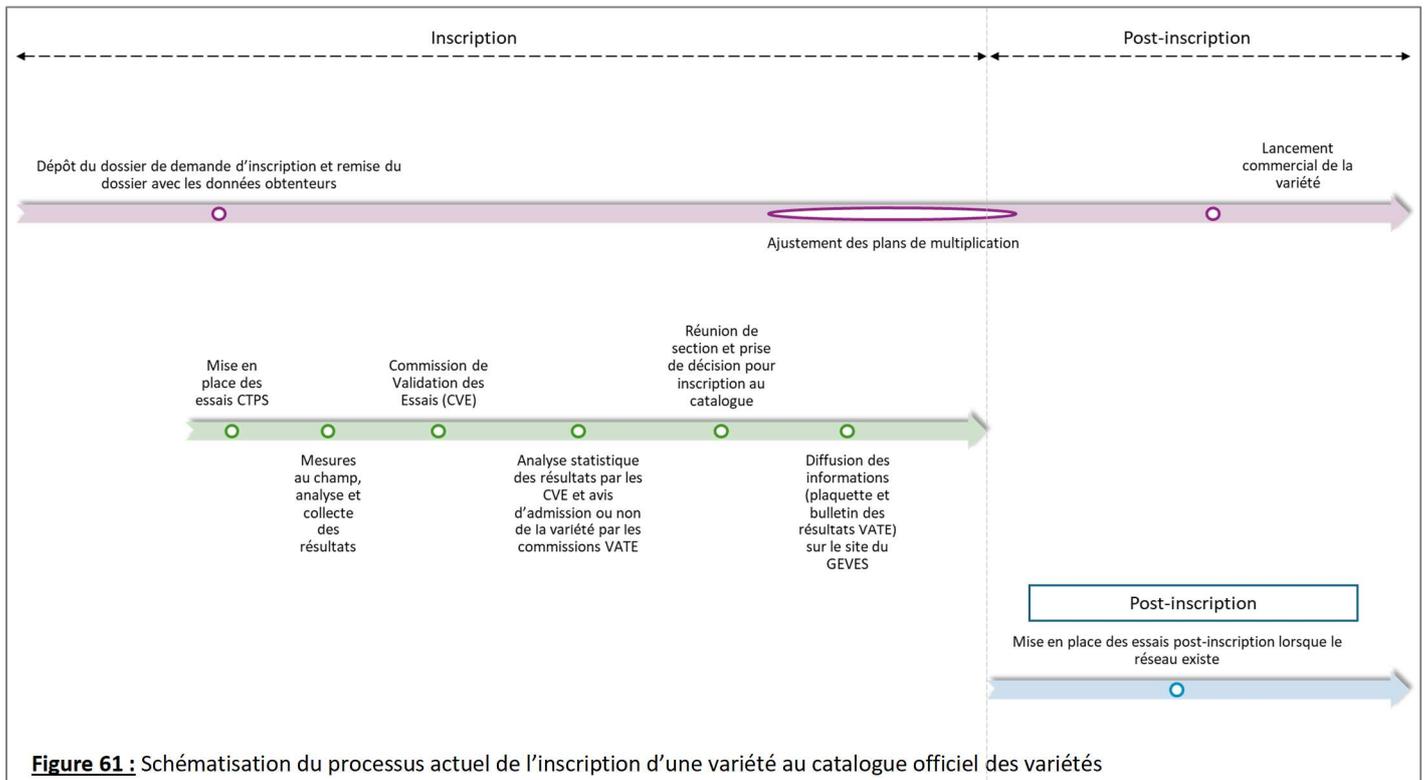
- b. Place de la modélisation dans l'évaluation des variétés face au changement climatique et possibilité de mener des expériences virtuelles ou d'ajuster des résultats expérimentaux

La mise en place d'un réseau d'essais est notamment contrainte par des questions budgétaires, ce qui limite l'exploration des nombreuses situations pédoclimatiques pouvant être rencontrées.

Certains modèles de culture peuvent permettre de pallier ce manque en testant virtuellement le comportement de variétés dans des situations simulées afin d'identifier certains comportements dans des situations n'ayant pas été rencontrées dans le réseau d'essais<sup>[B90]</sup>.

## 7. Une autre temporalité ?

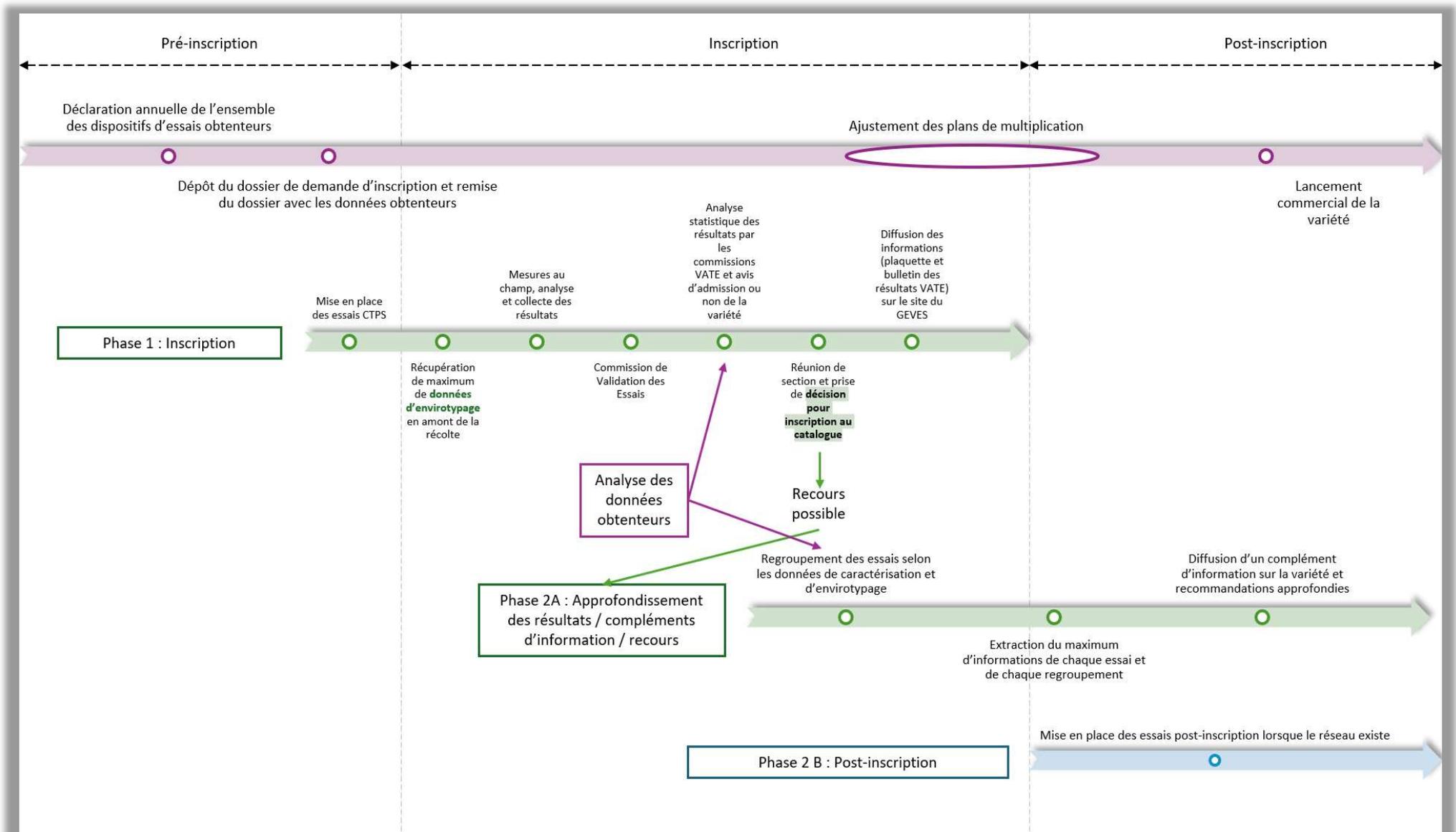
Dans le fonctionnement actuel (Figure 61), les décisions d'inscription au catalogue peuvent être rendues dans un délai relativement court, comme c'est le cas par exemple pour la section Colza et autres crucifères, où les récoltes et la réunion de section avec prise de décision sont distantes de seulement quelques jours. Pour la majorité des espèces, de délai entre récoltes et réunion de section avec prise de décision est de quelques semaines.



Compte tenu des différents éléments présentés dans ce chapitre (nécessité d'envirotypage, ajout d'un lieu d'anticipation, prise en compte des données obtenteurs, besoin de nouveaux critères pour la prise en compte de l'adaptation des variétés au changement climatique, regroupement d'essais...), qui peuvent induire davantage d'actions à mener avant la décision d'inscription, le CS du CTPS s'interroge sur la possibilité de découpler les différentes étapes selon le schéma présenté dans la Figure 62.

La phase 2A permettrait d'analyser plus en détail l'ensemble des données récoltées dans les essais CTPS, et pourrait ainsi venir apporter :

- Des résultats complémentaires jugés nécessaires par les sections, en attendant d'être en mesure de disposer de l'ensemble des critères à la date de décision d'inscription (phase transitoire)
- Un complément d'informations pour mieux caractériser les variétés, en particulier pour les espèces pour lesquelles il n'y a pas de réseau de post-inscription (fourrages et gazons, chanvre, CISPS, petites crucifères...).



**Figure 62 :** Proposition d'un nouveau processus, décorrélant inscription et complément d'information, et prenant en compte les données obtenteurs dans l'évaluation des variétés

Cette proposition de fonctionnement offrirait également la possibilité de mieux structurer les recours en utilisant les données obtenteurs dans le cas d'une allégation d'adaptation à des conditions non rencontrées dans le réseau CTPS.

Ce schéma de fonctionnement n'a pas nécessairement vocation à être mis en place dans l'ensemble des sections et commissions inter-sections du CTPS, mais pourrait être réfléchi pour tenir compte des besoins définis par chaque section vis-à-vis du calendrier et des données nécessaires à l'évaluation des variétés face aux enjeux du changement climatique.

#### 8. Faire évoluer le réseau d'essais ?

Face aux défis du changement climatique et à la multitude de combinaisons « stress x période d'occurrence », il faut chercher à capturer plus de diversité de situations dans le réseau d'essais. Il est donc recommandé, pour rester à coût constant, d'analyser chaque réseau en termes de diversité recherché, et de voir comment il pourrait évoluer pour explorer davantage de diversité (remplacer un essai assez proche d'un autre en le déplaçant dans un autre environnement, augmenter le nombre de lieux d'essais tout en diminuant le nombre de répétitions afin d'augmenter la puissance à l'échelle du réseau (par exemple, au lieu de 3 essais à 6 répétitions, passer à 5 essais à 3 répétitions) ... Il y a un besoin d'accompagnement des sections pour adapter leur réseau d'essais et pour en analyser les résultats, et cela peut se faire avec l'appui de biostatisticiens et de biométriciens.

Par ailleurs, l'azote étant le principal poste d'émission de gaz à effet de serre, il peut être intéressant d'envisager un pilotage différent concernant notamment la fertilisation azotée dans les essais VATE. Le réseau d'essai du CTPS doit ainsi viser des conduites avec des apports en azote minéral réduites par rapport à la ferme France, en lien avec la qualité des produits (par exemple, taux de protéines en blé tendre). En colza, le réseau CTPS est conduit à x-40u par rapport à la conduite classique (basée sur méthode des bilans) depuis une dizaine d'années.

Si cette conduite peut conduire à une baisse de rendement, elle devra être établie avec un objectif de maintien de la marge économique pour les agriculteurs dans un contexte où le prix de l'azote est à la hausse et souvent instable.

## **E. Synthèse du WP4**

Dans le contexte du changement climatique, il apparaît essentiel de réfléchir l'évaluation des variétés en vue de leur inscription au catalogue officiel des espèces et variétés de plantes cultivées, dit Catalogue national par rapport à la vitesse du renouvellement variétal, car les enjeux et les actions à mettre en place seront alors sensiblement différents. Plus le renouvellement variétal sera lent, moins les investissements en sélection seront forts, plus l'espèce sera menacée.

L'évaluation de l'aptitude d'adaptation des variétés au changement climatique nécessite une caractérisation des environnements d'essai, à travers l'envirotypage. En effet, le CS du CTPS propose de considérer la survenue d'un aléa comme un événement d'intérêt, informatif, qu'il faut être en mesure d'exploiter, et cela passe par une description fine des environnements rencontrés pour les différents essais.

De plus, la variabilité climatique interannuelle et l'impact des conditions annuelles sur les résultats des essais d'inscription soulèvent l'intérêt de réfléchir en termes de séries temporelles, en utilisant le maximum de données disponibles sur le plus long pas de temps possible : l'accent doit ainsi être mis sur le continuum pré-inscription / inscription / post-inscription pour augmenter la probabilité d'incidence de conditions climatiques concordantes avec les scénarios climatiques. A ce titre, la prise en compte des données obtenteurs est proposée, sous certaines conditions, pour offrir la possibilité de valoriser des adaptations intéressantes dans le cadre du changement climatique.

Plusieurs propositions d'adaptation des règles d'inscription sont par ailleurs formulées, pour prendre en compte les problématiques autour du changement climatique, parmi lesquelles : adopter une posture volontariste pour se placer dans des conditions qui vont être représentatives du futur climat que pourrait connaître la variété candidate en incluant un (ou plusieurs) site déporté qui soit représentatif du climat futur projeté, prendre en compte la stabilité des variétés dans un ensemble d'environnements, intégrer de nouveaux critères spécifiques à l'adaptation au changement climatique...

Chaque section du CTPS doit ainsi s'approprier les spécificités des espèces dont elle a la charge pour adapter ses règles d'inscriptions et faire évoluer son réseau d'essais afin de proposer une évaluation pertinente des variétés vis-à-vis des enjeux induits par le changement climatique. Pour cela, le CS du CTPS émet un certain nombre de recommandations qui sont présentées dans la partie suivante.

## WP5 : Les recommandations du CS

Au terme de cette saisine, à l'issue des nombreux échanges avec des experts extérieurs, avec les sections du CTPS et au sein du Comité Scientifique, le Comité Scientifique souhaite émettre quelques recommandations auprès du Comité Plénier du CTPS et des sections, en vue de mieux prendre en compte les enjeux du changement climatique lors de l'inscription des variétés de l'ensemble des espèces.

Les travaux du CS ont permis de mettre en évidence que le défi était majeur et qu'il convenait de s'en emparer sans délai et en lui donnant l'importance qu'il mérite. Il en va de la capacité des filières à répondre au défi climatique et il en va également de la performance du secteur semences et plants français et européen. Le défi présente des degrés variables entre espèces liés d'une part à leur physiologie et leurs réponses aux stress biotiques (notamment les bioagresseurs émergents) et abiotiques, et d'autre part au turn-over des variétés. Il y aura évidemment d'autres changements qui vont se produire simultanément, comme l'évolution de la consommation ou les changements structurels dans les filières. Il conviendra donc à chaque section de s'emparer de ces recommandations pour les décliner, après mise en débat, sur les différentes espèces dont elle a la charge.

Ces recommandations sont les suivantes :

- **Renforcer la capacité d'anticipation et d'orientation du CTPS** vis-à-vis du changement climatique. La capacité d'anticipation doit être assurée en ayant en permanence une vigilance sur ce sujet et en évitant que les aléas interannuels ne conduisent à perdre de vue la trajectoire longue. Cette capacité d'anticipation se manifeste par les orientations structurantes mises en place, notamment i) de nouveaux bonus, ii) le choix des lieux et des conditions d'essais, iii) l'évolution des types variétaux. Ces orientations doivent être adaptées à chaque espèce ou groupe d'espèces. **Il conviendrait que le Comité Plénier du CTPS assure l'animation transversale à l'ensemble des sections pour ces capacités d'anticipation et d'orientation.**
- Renforcer l'effort de recherche sur l'adaptation génétique des espèces et des variétés aux effets du changement climatique. Ceci concerne tout à la fois la recherche académique, la recherche appliquée dans les instituts techniques agricoles et la recherche dans les entreprises.
- **Actions à mettre en œuvre dans chaque section :**
  - Expliciter les effets attendus du changement climatique sur les espèces dont elles ont la charge, identifier les espèces les plus directement menacées, ainsi que les nouvelles espèces à introduire.
  - **Définir les traits affectés et les traits d'intérêt** en prenant en compte le turn-over variétal.
  - Renforcer la réflexion sur les performances variétales en valeur moyenne et en variance et introduire la notion de risque liée à la stabilité des performances variétales.

➔ Chaque section doit adapter les règles de décision pour l'inscription des variétés selon les attentes des producteurs et des utilisateurs et les besoins au regard du changement climatique (segmentation / stabilité / robustesse).

- **Caractérisation des essais via l’envirotypage :**
  - Les données pédoclimatiques / environnementales permettant la caractérisation des stress doivent rentrer dans les bases de données GEVES.
  - Se doter d’un outil de quantification du réservoir en eau utilisable (RU) du sol dans tous les essais qui sont menés sur des lieux constants d’une année sur l’autre, pré-requis pour quantifier finement les stress hydriques.
  - Expertiser et mutualiser les outils disponibles de caractérisation des stress avec les instituts techniques agricoles et les obtenteurs (lorsque cela est possible).
  - Faire de chaque donnée une information au regard du changement climatique, en évitant d’écarter les essais atypiques.
  
- **Adaptation du réseau d’essais VATE :**
  - Pour chaque espèce, au regard de la durée de vie moyenne d’une variété, et en utilisant les outils de projections des évolutions de climat, choisir au moins un site d’essai d’anticipation à inclure dans le réseau d’essais CTPS. Il convient ensuite de définir les modalités de prise en compte des informations issues de ce lieu d’anticipation (intégration dans l’ensemble du réseau vs. élaboration de bonus pour adaptation particulière). Un tel site pourrait être obtenu dans le cadre des collaborations entre le GEVES et ses homologues européens.
  - Adapter les pratiques et itinéraires culturaux mis en œuvre dans les essais d’inscription aux conditions induites par le changement climatique, à la fois dans une logique d’adaptation et d’atténuation du changement climatique, et en mobilisant les principes de l’agroécologie.
  - Dans la mesure où des stress croissants sont identifiés sur une culture, veiller à conserver des sites expérimentaux qui présentent des conditions à risque dans les dispositifs d’évaluation variétale, voire les enrichir si nécessaire. Par exemple, pour le stress hydrique, placer certains essais sur des sols superficiels.
  
- **Prise en compte des données obtenteurs :**
  - Mobiliser autant que de possible les essais mis en œuvre par les sélectionneurs au cours du processus de sélection pour identifier certains essais révélateurs de comportements variétaux intéressants face aux effets attendus du changement climatique. Pour cela, il faut inciter les déposants à **fournir des données pré-inscription** pour apporter de l’information lors de l’inscription, information qui pourra être mobilisée après inscription. Dans cet objectif, il faut que le déposant déclare ses dispositifs *a priori* et les itinéraires techniques associés, sans communiquer sur les génétiques testées, et le CTPS utilisera ces informations en cas de besoin. Ceci serait mis en œuvre dans le cadre de processus d’audits et de vérification.
  
- **Présentation et valorisation des données obtenues dans les évaluations :**
  - Mobiliser l’ensemble des acteurs et les sensibiliser à la nécessité de collecter les données « environnement et conduite » afin de caractériser les essais et valoriser ces informations dans les plaquettes VATE publiées par le GEVES ou autres acteurs du CTPS.
  - Donner accès aux données des expérimentations avec description de l’environnement et assorties des éléments de compréhension de ces données individuelles pour renforcer le conseil, l’aide à la décision, et les projections sur les futurs climatiques possibles. Insérer cette recommandation dans une adaptation des flow-charts de traitement de l’information, au regard des scénarios climatiques.

- **Accompagnements à mettre en œuvre :**
  - Accompagner les sections dans la **montée en compétences scientifiques, techniques (et statistiques)** nécessaires aux changements à mettre en œuvre et expliquer la démarche aux obtenteurs, au travers de formations (notion de lieu d'anticipation, traitement de l'information, valorisation de tous les essais...). Pour cela, il faut que le GEVES mette en place des documents supports.
  - Inclure des biométriciens dans les Commissions de Validation des Essais, réaliser des bilans de campagnes, étudier si nécessaire les résultats pré-inscription des obtenteurs, renforcer les compétences en statistiques au niveau du CTPS et du GEVES, en mettant en œuvre les méthodes statistiques les plus récentes permettant d'analyser les réponses à l'environnement. Le principe premier doit être l'absence de données non-utilisées (0-déchets). Ceci permettra aussi de réviser les dispositifs d'essais et notamment le nombre de répétitions et plus largement de mettre en œuvre toutes les procédures vertueuses à l'égard de cet objectif de performance statistique. Plus largement, explorer la possibilité de réviser les procédures de traitement des informations issues des lieux et des essais pour aboutir à la décision d'inscription des variétés et de production des résultats caractérisant la valeur agronomique, technologique et environnementale des variétés en réponse au changement climatique, et pour anticiper leurs réponses aux climats futurs.
  - Au regard des effets induits par les changements climatiques et notamment les variations interannuelles, sécuriser les lieux où les essais DHS sont conduits pour produire des données de qualité.
  - Pour les espèces et groupes d'espèces sans VATE obligatoire, les sections du CTPS doivent s'interroger sur l'organisation du continuum et sur les corpus de résultats qu'il convient de fournir et de rendre disponibles pour permettre aux acteurs des filières et in fine aux agriculteurs d'anticiper les effets du changement climatique.
  
- **Positionnement vis-à-vis de la diversification :**
  - Pour favoriser la diversification via l'introduction de nouvelles espèces, développer une activité de veille et mettre en place des évaluations adaptées pour permettre l'accès au marché.
  - Concernant la diversification à l'échelle de la parcelle agricole (mélanges par exemple), poursuivre la mise en place des évaluations adaptées dans le cas d'allégations par l'obteneur d'une aptitude à répondre à au moins un enjeu posé par le changement climatique.
  
- Pour la **filière Semences et Plants**, avoir un suivi longitudinal sur l'évolution de la compétitivité des différents segments vis à vis des effets du changement climatique, des composantes de cette compétitivité (qualité des semences, productivité) et poursuivre l'analyse du lien aux effets du changement climatique, tel qu'initié par l'interprofession SEMAE. Plus largement, il faut renforcer les compétences disponibles au sein de la filière, depuis les entreprises de sélection jusqu'aux agriculteurs multiplicateurs et producteurs de plants. Ces montées en compétences doivent prendre explicitement en compte les effets induits par le changement climatique. Ceci permettra d'intégrer rapidement les enjeux du changement climatique dans les orientations de la sélection conduites chez les obtenteurs, dans les orientations et décisions élaborées par les sections et les acteurs des filières semences et plants.

## Conclusion

En s'appuyant sur une analyse approfondie de la littérature scientifique, sur les travaux en cours au sein de la communauté scientifique sur les incidences du changement climatique, ce rapport émet différentes recommandations pour répondre à ce défi majeur qu'est l'adaptation au changement climatique. De toutes les transitions qu'ont traversées, au cours des dernières décennies, les productions agricoles, l'amélioration génétique et l'inscription des variétés au catalogue national, l'adaptation au changement climatique est sans doute la plus complexe. En effet, les paramètres de l'adaptation ne sont pas les mêmes pour toutes les espèces et la trajectoire à adopter pour une adaptation longue peut être floutée par les variations interannuelles, qui pourtant sont également les expressions des effets du changement climatique. Ce rapport s'inscrit à la suite du rapport de saisine sur la contribution du levier variétal à la transition agroécologique et sur l'incidence de l'émergence de l'édition du génome. Comme vous avez pu le lire, ces deux rapports précédents viennent nourrir le présent document, comme étant des leviers de réponse au défi climatique.

Le rapport produit par le Comité Scientifique du CTPS est d'une grande densité. Il est le fruit d'une mobilisation forte et enthousiaste du Comité Scientifique, mais aussi de l'ensemble des instances du CTPS et notamment des présidents et secrétaires techniques des différentes sections. Ceci laisse augurer d'une mise en débat, dans chaque section, de ces éléments scientifiques et des recommandations et d'une mise en œuvre adaptée. Les membres du Comité Scientifique se tiennent à la disposition des différentes sections pour les accompagner dans l'appropriation de ce travail et dans l'analyse des modalités de déclinaison opérationnelle.

Au moment où vous achèverez la lecture de ce rapport, certaines questions pourront émerger et faire débat. Permettez-nous de revenir sur deux choix de périmètre faits par le Comité Scientifique, en lien avec la Présidence du CTPS.

Pour des raisons de capacité à traiter le sujet dans le délai imparti de cette saisine, nous avons écarté, dès le début des travaux de parler beaucoup des stress biotiques et de l'évolution des ravageurs sous l'effet du changement climatique. L'année 2024, dont la météorologie est cohérente avec les effets attendus du changement climatique, est un douloureux rappel de l'incidence des pressions de bioagresseurs sur les différentes cultures dans le cas d'années chaudes et humides. Il y a à la fois une pression forte, voire extrême pour certaines productions, de la pression fongique, mettant parfois à mal certaines constructions génétiques. Pour cette situation, le dispositif actuel du CTPS permet de mesurer la performance des variétés proposées à l'inscription. Il faut donc que chaque section, pour répondre à cette dimension du changement climatique, revisite la façon dont les résistances génétiques aux bioagresseurs sont intégrées dans les cotations et donc les décisions d'inscription des variétés. Outre l'augmentation de la pression des bioagresseurs déjà présents sur le territoire, le changement climatique pourra également favoriser l'extension des zones de présence de nouveaux bioagresseurs, notamment champignons et insectes. L'anticipation des émergences est difficile. Elle ne peut être du rôle du CTPS, mais doit être assurée par une mobilisation collective, notamment des services de l'Etat et de la recherche publique, via des dispositifs d'épidémiosurveillance adaptés. La réponse génétique à ces nouveaux bioagresseurs vient dans un second temps, même s'il faut que le délai soit le plus court possible.

La seconde dimension non couverte dans ce rapport est celle de la contribution des variétés et donc de l'amélioration génétique, à l'atténuation du changement climatique. L'objectif mondial, européen et national à la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) est particulièrement ambitieux, et se décline au travers de stratégies. La stratégie nationale bas carbone (SNBC) est en cours de finalisation dans sa troisième version, et conduira à identifier les objectifs à atteindre par secteur d'activité, dont le secteur agricole. Il était donc prématuré dans le cadre du rapport de saisine du CTPS

de traiter d'un sujet dont l'ambition déclinée sur notre secteur n'avait pas encore été précisée. Mais sachant la part très importante de l'agriculture dans les émissions de GES nationales (19%), et la particularité des émissions par rapport aux autres secteurs, l'agriculture émettant beaucoup de méthane et de protoxyde d'azote et peu de dioxyde de carbone, ce sujet demandera un travail spécifique où l'amélioration génétique des espèces cultivées devra prendre toute sa part. En effet, la qualité des aliments peut jouer un rôle dans la réduction des émissions de méthane entérique par les ruminants. Mais surtout, les émissions de protoxyde d'azote et certaines émissions indirectes de CO<sub>2</sub> étant liées à la fertilisation azotée, l'amélioration génétique de l'efficacité d'utilisation de l'azote (NUE) par les variétés et les cultures constitue une voie privilégiée pour réduire les émissions de GES. De façon plus générale, l'amélioration massive des NUE est la voie privilégiée pour ramener nos systèmes agricoles et alimentaires dans les limites planétaires en matière d'utilisation des nutriments et en particulier de l'azote. Ce fut historiquement la première limite planétaire franchie. Ce sujet pourrait constituer un beau sujet d'étude pour une prochaine saisine...

Comme ceci a été mentionné au long de ce rapport, l'adaptation au changement climatique va demander des ruptures dans nos modes de fonctionnement et dans nos modes de conception. Ce peut être aussi l'occasion d'une mobilisation nouvelle des relations au niveau européen, entre les différents dispositifs nationaux d'inscription des variétés et entre les différents offices d'examen. Nous avons ainsi mentionné dans ce rapport que le lieu externe d'anticipation des effets du changement climatique pouvait être proposé par un des offices d'examen homologues du GEVES. Mais, de façon plus ambitieuse, et compte-tenu une fois de plus de l'ampleur du défi, la question traitée dans ce rapport pourrait devenir un thème de travail à l'échelle européen.

Nous espérons que la lecture de ce rapport aura été aussi stimulante que sa préparation et sa rédaction ne le furent pour l'ensemble des membres du Comité Scientifique.

## Bibliographie

[B1] : Food and Agriculture Organization of the United Nations (2023). Commission des ressources génétiques pour l'alimentation et l'agriculture - Changement climatique et ressources génétiques pour l'alimentation et l'agriculture.

[B2] : Pixley K.V., Cairns J.E., Lopez-Ridaura S., Ojiewo C.O., Dawud M.A., Drabo I., Mindaye T., Nebie B., Asea G., Das B., Daudi H., Desmae H., Batiemo B.J., Boukar O., Mukankusi C.T.M., Nkalubo S.T., Hearne S.J., Dhugga K.S., Gandhi H., Snapp S. & Zepeda-Villarreal E.A. (2023). Redesigning crop varieties to win the race between climate change and food security. *Mol. Plant.* 16 (10), 1590-1611. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2023.09.003>

[B3] : Zhao J., Bindi M., Eitzinger J., Ferrise R., Gaile Z., Gobin A., Holzkämper A., Kersebaum K.C., Kozyra J., Kriaučiūnienė Z., Loit E., Nejedlik P., Nendel C., Niinemets U., Palosuo T., Peltonen-Sainio P., Potopová V., Ruiz-Ramos M., Reidsma P., Rijk B., Trnka M., van Ittersum M.K. & Olesen J.E. (2022). Priority for climate adaptation measures in European crop production systems. *European Journal of Agronomy*, 138. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126516>

[B4] : European Environment Agency (2019). Climate change adaptation in the agriculture sector in Europe.

[B5] : Haut Conseil pour le Climat (2024). Accélérer la transition climatique avec un système alimentaire bas carbone, résilient et juste.

[B6] : ODEADOM & Chambres d'agriculture France (2023). Séminaire agricultures ultramarines et changement climatique - Jeux, transitions et adaptation. Actes du séminaire.

[B7] : Intergovernmental Panel on Climate Change (2023). Climate change 2023 - Synthesis Report.

[B8] : Haut Conseil pour le Climat (2023). Acter l'urgence - Engager les moyens.

[B9] : Bastin J-F., Clark E., Elliott T., Hart S., van den Hoogen J., Hordijk I., Ma H., Majumder S., Manoli G., Maschler J., Mo L., Routh D. Yu K., Zohner C.M. & Crowther T.W. (2019). Understanding climate change from a global analysis of city analogues. *PLoS ONE*, 14(7). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217592>

[B10] : Arvalis (2022). Bilan de campagne Maïs fourrage 2022. Dossier de presse.

[B11] : Agreste (2022). Synthèses conjoncturelles - Bilan conjoncturel 2022.

[B12] : Météo France (2024). Bilan climatique de l'hiver 2024 - 1er décembre - 29 février.

[B13] : Courtney P. Leisner, Neha Potnis, Alvaro Sanz-Saez (). Crosstalk and trade-offs : Plant responses to climate change-associated abiotic and biotic stresses.

[B14] : Sadok W. & Krishna Jagadish S.V. (2020). The Hidden Costs of Nighttime Warming on Yields. *Trends in Plant Science* 25 (7). <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2020.02.003>

[B15] : Castel T., Lecomte C., Richard Y., Lejeune-Henaut I.I. & Larmure A. (2019). Évolution retrospective du risque gélif hivernal en climat tempéré suite au réchauffement climatique. *Bourgogne-Franche-Comté Nature* 29, 323-332.

[B16] : Pitchers J., Ferrand N., Pull M., Minette S., Abela M. & Debaeke P. (2023). Opportunities and risks of double cropping in southwestern France with a focus on soybean and sunflower crops. OCL 30 (16). <https://doi.org/10.1051/ocl/2023016>

[B17] : Caubel J., Launay M., Ripoche D., Gouache D., Buis S., Huard F., Huber L. Brun F. & Bancal M.O. (2017). Climate change effects on leaf rust of wheat: Implementing a coupled crop-disease model in a French regional application. European Journal of Agronomy 90, 53-66. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.07.004>

[B18] : Gouache D., Bouchon A-S., Jouanneau E. & Le Bris X. (2015). Agrometeorological analysis and prediction of wheat yield at the departmental level in France. Agricultural and Forest Meteorology 209, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.04.027>

[B19] : France AgriMer, Arvalis & Terres Inovia (2016). Récolte 2016 de céréales à paille, colza et pois : une année hors norme. Communiqué de presse.

[B20] : Zandalinas S.I., Fritschi F.B. & Mittler R. (2021). Global Warming, Climate Change, and Environmental Pollution: Recipe for a Multifactorial Stress Combination Disaster. Trends Plant Sci., 26(6), 588-599. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2021.02.011>

[B21] : Conseil Général de l'Alimentation, de l'Agriculture et des Espaces Ruraux (2022). Décarboner 100% de l'énergie utilisée en agriculture à l'horizon 2050 : c'est possible !

[B22] : Grisey A., Brajeul E. & Oudin T. (2022). Enquête 2021 auprès des producteurs de tomate et de concombre sous serre sur l'utilisation de l'énergie - quelles sont les évolutions du parc de serres et des équipements de chauffage en France depuis 2016 ? Infos CTIFL, 385, 35-39.

[B23] : Conseil Economique Social et Environnemental (2023). Comment favoriser une gestion durable de l'eau (quantité, qualité, partage) en France face aux changements climatiques ? ISSN 0767-4538 ISBN 978-2-11-167379-3

[B24] : Nicotra A.B., Atkin O.K., Bonser S.P., Davidson A.M., Finnegan E.J., Mathesius U., Poot P., Purugganan M.D., Richard, C.L., Valladares F. & van Kleunen M. (2010). Plant phenotypic plasticity in a changing climate. Trends Plant Sci., 15, 684-692. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2010.09.008>

[B25] : Urruty N., Tailliez-Lefebvre D. & Huyghe C. (2016). Stability, robustness, vulnerability and resilience of agricultural systems. A review. Agron. Sustain. Dev. 36, 15. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0347-5>

[B26] : Challinor A.J., Watson J., Lobell D.B., Howden S.M., Smith D.R. & Chhetri N. (2014). A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. Nature Clim Change 4, 287–291. <https://doi.org/10.1038/nclimate2153>

[B27] : Kopeć P. (2024). Climate Change—The Rise of Climate-Resilient Crops. Plants 13 (4), 490. <https://doi.org/10.3390/plants13040490>

[B28] : Aubin-Horth N. (2024). Ecophysiologie évolutive. Université Laval. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10817934>

[B29] : Schneider H.M. (2022). Characterization, costs, cues and future perspectives of phenotypic plasticity. Annals of Botany 130, 131-148. <https://doi.org/10.1093/aob/mcac087>

[B30] : Roucou A. (2018). Compromis écophysiologicals et contraintes biophysiques chez les céréales: impacts de la sélection agronomique et des conditions environnementales. [Thèse de doctorat, Montpellier SupAgro].

[B31] : Segrestin J., Sartori K., Navas M-L., Kattge J., Díaz S. & Garnier E. (2021). PhenoSpace: A Shiny Application to Visualize Trait Data in the Phenotypic Space of the Global Spectrum of Plant Form and Function . *Ecology and Evolution* 11 (4), 1526:34. <https://doi.org/10.1002/ece3.6928>

[B32] : Cadena C.D., Zapata F. & Jiménez I. (2018). Issues and Perspectives in Species Delimitation using Phenotypic Data: Atlantean Evolution in Darwin's Finches. *Systematic Biology* 67 (2), 181-194. <https://doi.org/10.1093/sysbio/syx071>

[B33] : Solé-Medina A., Robledo-Arnuncio J.J. & Ramírez-Valiente J.A. (2022). Multi-trait genetic variation in resource-use strategies and phenotypic plasticity correlates with local climate across the range of a Mediterranean oak (*Quercus faginea*). *New Phytologist* 234 (2), 462-478. <https://doi.org/10.1111/nph.17968>

[B34] : Sartori K., Vasseur F., Violle C., Baron E., Gerard M., Rowe N., Ayala-Garay O., Christophe A., Garcia de Jalón L., Masclef D., Harscouet E., del Rey Granada M., Chassagneux A., Kazakou E. & Vile D. (2019). Leaf Economics and Slow-Fast Adaptation across the Geographic Range of *Arabidopsis Thaliana*. *Scientific Reports* 9 (1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46878-2>

[B35] : Reyes-Puig C., Enriquez-Urzelai U., Carretero M.A. & Kaliontzopoulou A. (2024). Is it all about size? Dismantling the integrated phenotype to understand species coexistence and niche segregation. *Functional Ecology*. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.14646>

[B36] : Rolhauser A.G., Isaac M.E., Violle C., Martin A.R., Vasseur F., Lemoine T., Mahaut L., Fort F., Rotundo J.L. & Vile D. (2024). Phenotypic limits of crop diversity: a data exploration of functional trait space. *New Phytologist* 244 (2), 707-718. <https://doi.org/10.1111/nph.20050>

[B37] : Michelaki C., Fyllas N.M., Galanidis A., Aloupi M., Evangelou E., Arianoutsou M. & Dimitrakopoulos P.G. (2019). An integrated phenotypic trait-network in thermo-Mediterranean vegetation describing alternative, coexisting resource-use strategies. *Science of The Total Environment* 672, 583-592. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.030>

[B38] : Milla R., Bastida J.M., Turcotte M.M., Jones G., Violle C., Osborne C.P., Chacón-Labela J., Sosinski Jr E.E., Kattge J., Laughlin D.C., Forey E., Minden V., Cornelissen J.H.C, Amiaud B., Kramer K., Boenisch G., He T., Pillar V.D. and Byun C. (2018). Phylogenetic patterns and phenotypic profiles of the species of plants and mammals farmed for food. *Nature Ecology & Evolution* 2(11), 1808-17. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0690-4>

[B39] : Matesanz S. & Milla R. (2017). Differential plasticity to water and nutrients between crops and their wild progenitors. *Environmental and Experimental Botany* 145, 54–63. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.10.014>

[B40] : Snowdon R.J., Wittkop B., Chen T-W. & Stahl A. (2021). Crop adaptation to climate change as a consequence of long-term breeding. *Theoretical and Applied Genetics*, 134:1613–1623. <https://doi.org/10.1007/s00122-020-03729-3>

[B41] : Schauburger B., Ben-Ari T., Makowski D., Kato T., Kato H. & Ciais P. (2018). Yield trends, variability and stagnation analysis of major crops in France over more than a century. *Sci Rep* 8. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-35351-1>

[B42] : Voss-Fels K.P., Stahl A., Wittkop B., Lichthardt C., Nagler S., Rose T., Chen T.-W., Zetzsche H., Seddig S., Baig M.M., Ballvora A., Frisch M., Ross E., Hayes B.J., Hayden M.J., Ordon F., Leon J., Kage H., Friedt W., Stützel H. and Snowdon R.J. (2019). Breeding improves wheat productivity under contrasting agrochemical input levels. *Nat. Plants* 5, 706–714. <https://doi.org/10.1038/s41477-019-0445-5>

[B43] : Welcker C., Spencer N.A., Turc O., Granato I., Chapuis R., Madur D., Beauchene K., Gouesnard B., Draye X., Palaffre C., Lorgeou J., Melkior S., Guillaume C., Presterl T., Murigneux A., Wisser R.J., Millet E.J., van Eeuwijk F., Charcosset A. & Tardieu F. (2022). Physiological adaptive traits are a potential allele reservoir for maize genetic progress under challenging conditions. *Nat Commun* 13, 3225. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30872-w>

[B44] : Blum A. (2005). Drought Resistance, Water-Use Efficiency, and Yield Potential—Are They Compatible, Dissonant, or Mutually Exclusive?. *Australian Journal of Agricultural Research*, 56 (11). <https://doi.org/10.1071/AR05069>

[B45] : Blum A. (2009). Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. *Field Crops Research*, 112, 119-123. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.03.009>

[B46] : Reynolds M.P., Lewis J.M., Ammar K., Basnet B.R., Crespo-Herrera L., Crossa J., Dhugga K.S., Dreisigacker S., Juliana P., Karwat H., Kishii M., Krause M.R., Langridge P., Lashkari A., Mondal S., Payne T., Pequeno D., Pinto F., Sansaloni C., Schulthess U., Singh R.P., Sonder K., Sukumaran S., Xiong W., Braun H.J. (2021). Harnessing translational research in wheat for climate resilience. *J Exp Bot.* 72(14), 5134-5157. <https://doi.org/10.1093/jxb/erab256>

[B47] : Varenne agricole de l'eau et de l'adaptation au changement climatique (2022). Rapport de la thématique 2 - Renforcer la résilience de l'agriculture dans une approche globale en agissant notamment sur les sols, les variétés, les pratiques culturales, les infrastructures agroécologiques et l'efficacité de l'eau d'irrigation.

[B48] : M. Cooper & C.D. Messina (2023). Breeding crops for drought-affected environments and improved climate resilience. *The Plant cell*, 35, 162-186. <https://doi.org/10.1093/plcell/koac321>

[B49] : Venkatesh K., Senthilkumar K.M., Mamrutha H.M., Singh G. & Singh G.P. (2021). High-temperature stress in wheat under climate change scenario, effects and mitigation strategies. *Climate Change and Crop Stress: Molecules to Ecosystems*, pp. 209-229. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816091-6.00014-6>

[B50] : Kumar A., Patel J.S., Meena V.S. & Srivastava R. (2019). Recent advances of PGPR based approaches for stress tolerance in plants for sustainable agriculture. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 20, 101271. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101271>

[B51] : De Vries F.T., Griffiths R.I., Knight C.G., Nicolitch O. & Williams A. (2020). Harnessing rhizosphere microbiomes for drought-resilient crop production. *Science*, 368(6488), 270–274. <https://doi.org/10.1126/science.aaz5192>

[B52] : Ben-Ari T., Boé J., Ciais P., Lecerf R., Van der Velde M. & Makowski D. (2018). Causes and implications of the unforeseen 2016 extreme yield loss in the breadbasket of France. *Nature Communications* 9 (1627). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04087-x>

[B53] : Gallais A. (1992). Pourquoi faire des variétés synthétiques ? *Agronomie* 12, 601-609. <https://doi.org/10.1051/agro:19920803>

[B54] : Morgounov A., Özdemir F., Keser M., Akin B., Dababat A.A., Dreisigacker S., Golkari S., Koc E., Küçükçongar M., Muminjanov H., Nehe A., Rasheed A., Roostaei M., Sehgal D. & Sharma R. (2021). Diversity and adaptation of currently grown wheat landraces and modern germplasm in Afghanistan, Iran, and Turkey. *Crops* 1, 54-67. <https://doi.org/10.3390/crops1020007>

[B55] : Gain C., Rhoné B., Cubry P., Salazar I., Forbes F., Vigouroux Y., Jay F. & François O. (2023). A Quantitative Theory for Genomic Offset Statistics. *Molecular Biology and Evolution*, 40 (6). <https://doi.org/10.1093/molbev/msad140>

[B56] : Marc J-V. (2011). Le jardin créole à Fort-de-France : stratégie de résistance face à la pauvreté ? *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, 1(11). <https://doi.org/10.4000/vertigo.10804>

[B57] : Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique (2012). Les outre-mer face au défi du changement climatique. La Documentation française.

[B58] : Goldringer I & Rivière P. (2018). Methods and Tools for decentralized on farm breeding. Booklet #3, Diversifood Project.

[B59] : Enjalbert J., Dawson J.C., Paillard S., Rhoné B., Rousselle Y., Thomas M. & Golringer I. (2011). Dynamic management of crop diversity: From an experimental approach to on-farm conservation . *C. R. Biol.* 334, no. 5-6, pp. 458-468. <https://10.1016/j.crvi.2011.03.005>

[B60] : Hufnagel J., Reckling M. & Ewert F. (2020). Diverse approaches to crop diversification in agricultural research. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 40, 14. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00617-4>

[B61] : Renard D. & Tilman D. (2019). National food production stabilized by crop diversity. *Nature* 571, 257–260. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1316-y>

[B62] : Délégation interministérielle pour le Varenne agricole de l'eau et de l'adaptation au changement climatique (2023). Des cultures qui migrent et qui se développent à la faveur du changement climatique.

[B63] : Heinz M., Galetti V. & Holzkämper A. (2024). How to find alternative crops for climate-resilient regional food production. *Agricultural Systems* 213, 103793. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103793>.

[B64] : Angeli V., Miguel Silva P., Crispim Massuela D., Khan M.W., Hamar A., Khajehei F., Graeff-Hönninger S. & Piatti C. (2020). Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): An Overview of the Potentials of the “Golden Grain” and Socio-Economic and Environmental Aspects of Its Cultivation and Marketization. *Foods*, 9, 216. <https://doi.org/10.3390/foods9020216>

[B65] : Intercéréales (2023). Des chiffres et des céréales - L'essentiel de la filière.

[B66] : SEMAE (2024). Les chiffres de la filière semences et plants - Campagne 22/23.

[B67] : ANSES (2017). Saisine « 2016-SA-0129 Patate douce-Igname » : Risques d'introduction d'organismes nuisibles via des vitroplants de patate douce (*Ipomoea batatas*) et d'igname (*Dioscorea* sp.). Rapport d'appui scientifique et technique.

[B68] : GEVES (Version en vigueur pour la campagne 2024). Protocole d'expérimentation - Blé tendre - Essais de Valeur Agronomique Technologique et Environnementale.

[B69] : Nébih (2024). Búza kísérleti módszertan.

[B70] : Grains Research & Development Corporation (GRDC) (2024). National Variety Trials Protocols.

[B71] : Board for Plant Varieties (Rvp) and Recommended List Committee (CSAR) (2023). Protocol for the examination of value for cultivation and use of winter wheat varieties.

[B72] : Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský, Národní odrůdový úřad (2019). METODIKA ZKOUŠEK UŽITNÉ HODNOTY - PŠENICE.

[B73] : BUNDESSORTENAMT (2016). Kapitel 4.1 Getreide (außer Mais und Sorghumhirse) der Richtlinien für die Durchführung von landwirtschaftlichen Wertprüfungen und Sortenversuchen.

[B74] : GEVES (Version en vigueur pour la campagne 2023). Protocole d'expérimentation - Maïs Grain - Essais de Valeur Agronomique Technologique et Environnementale.

[B75] : GEVES (Version en vigueur pour la campagne 2023). Protocole d'expérimentation - Maïs Fourrage - Essais de Valeur Agronomique Technologique et Environnementale.

[B76] : Nébih (2021). Kukorica kísérleti módszertan.

[B77] : Board for Plant Varieties (Rvp) and Recommended List Committee (CSAR) (2024). Protocol for the examination of value for cultivation and use of forage and grain maize varieties in the Netherlands.

[B78] : Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský, Národní odrůdový úřad (2019). METODIKA ZKOUŠEK UŽITNÉ HODNOTY - KUKUŘICE (na zrno a na siláž).

[B79] : BUNDESSORTENAMT (2008). Überarbeitete Richtlinie Mais.

[B80] : GEVES (Version en vigueur pour la campagne 2023). Protocole d'expérimentation - Blé tendre d'hiver - Evaluation de Variété Economes en Azote - Essais de Valeur Agronomique Technologique et Environnementale.

[B81] : GEVES (Version en vigueur pour la campagne 2024). Protocole d'expérimentation - Céréales à paille - Etude des Bioagresseurs et autres facteurs de régularité du rendement.

[B82] : Recommended List Committee (CSAR) (2023). 99e Aanbevelende Rassenlijst 2024 - Akkerbouw- en Veehouderij.

[B83] : Grains Research & Development Corporation (GRDC) (2024). Trial Report - WHEAT, MAYRUNG NSW, MAIN SEASON, 2023.

[B84] : GOSZ-VSZT-NAK (2023). Őszi búza - Posztregisztrációs Fajtakísérletek.

- [B85] : Xu Y. (2016). Envirotyping for deciphering environmental impacts on crop plants. *Theor Appl Genet* 129, 653–673. <https://doi.org/10.1007/s00122-016-2691-5>
- [B86] : Bouthier A., Scheurer O., Seger M., Lagacherie P., Beaudoin N., Deschamps T., Sauter J., Fort JL. & Cousin I. (2022). Réservoir en eau du sol utilisable par les cultures. éditions Arvalis.
- [B87] : Ahmad U., Alvino A. & Marino, S.A. (2021). A Review of Crop Water Stress Assessment Using Remote Sensing. *Remote sens.* 13, 4155. <https://doi.org/10.3390/rs13204155>
- [B88] : Ihuoma S.O. & Madramootoo C.A. (2017). Recent advances in crop water stress detection. *Computers and Electronics in Agriculture* 141, 267-75. <https://doi:10.1016/j.compag.2017.07.026>
- [B89] : Berger K., Machwitz M., Kycko M., Kefauver S.C., Van Wittenberghe S., Gerhards M., Verrelst J., Atzberger C., van der Tol C., Damm A., Rascher U., Herrmann I., Sobejano Paz V., Fahrner S., Pieruschka R., Prikaziuk E., Buchailot M.L., Halabuk A., Celesti M., Koren G., Tunc Gormus E., Rossini M., Foerster M., Siegmann B., Abdelbaki A., Tagliabue G., Hank T., Darvishzadeh R., Aasen H., Garcia M., Pôças I., Bhandopadhyay S., Sulis M., Tomelleri E., Rozenstein O., Filchev L., Stancile G. & Schlerf M. (). Multi-Sensor Spectral Synergies for Crop Stress Detection and Monitoring in the Optical Domain: A Review. *Remote Sensing of Environment* 280. <https://doi:10.1016/j.rse.2022.113198>
- [B90] : Jeuffroy M-H., Casadebaig P., Debaeke P., Loyce C. & Meynard J-M. (2013). Agronomic model uses to predict cultivar performance in various environments and cropping systems. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 34, 121–137. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0170-9>
- [B91] : Tolhurst D.J., Gaynor R.C., Gardunia B., Hickey J.M. & Gorjanc G (2022). Genomic selection using random regressions on known and latent environmental covariates. *Theor Appl Genet* 135, 3393–3415.
- [B92] : CNPF (2021). Dossier ESPERENSE : un réseau d'essais pour les essences de demain. *Forêt entreprise*, N°260, 20-49.
- [B93] : Tolhurst D.J. (2023). Genomic prediction models, selection tools and association studies for genotype by environment data. [Thèse de doctorat, University of Edinburgh].

## Sitographie

[S1] : <https://www.ecologie.gouv.fr/impacts-du-changement-climatique-atmosphere-temperatures-et-precipitations>

[S2] : <http://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/339>

[S3] : <https://ccexplorer.eu/>

[S4] : <https://vigieau.gouv.fr/>

[S5] : <https://www.terre-net.fr/tournesol/article/221034/estimations-de-rendements-en-tournesol-recolte-2022>

[S6] : <https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/actualites/printemps-2024-le-4e-printemps-le-plus-arrose-jamais-enregistre>

[S7] : <https://www.action-agricole-picarde.com/un-potentiel-degrade-en-cereales-paille-pour-la-France>

[S8] : <https://www.terre-net.fr/moisson/article/869451/la-recolte-francaise-de-ble-tendre-2024-chute-a-un-peu-moins-de-30-millions-de-tonnes>

[S9] : <https://www.lequotidien.re/a-la-reunion/la-recolte-de-letchis-sannonce-bien-meilleure-que-la-precedente/>

[S10] : <https://la1ere.francetvinfo.fr/reunion/mauvaise-campagne-sucriere-letchis-en-difficulte-exportation-d-ananas-en-baisse-les-consequences-du-dereglement-climatique-a-la-reunion-1443896.html>

[S11] : <https://www.lesechos.fr/2017/10/devastee-par-maria-la-filiere-banane-des-antilles-veut-repartir-de-zero-183998>

[S12] : <https://www.odeadom.fr/banane/>

[S13] : <https://www.terre-net.fr/economie-agricole/article/869835/catastrophique-la-campagne-sucriere-2024-en-guadeloupe-prendra-fin-samedi>

[S14] : [https://fiches.arvalis-infos.fr/fiche\\_accident/fiches\\_accidents.php?mode=fa&type\\_cul=1&type\\_acc=5&id\\_acc=64](https://fiches.arvalis-infos.fr/fiche_accident/fiches_accidents.php?mode=fa&type_cul=1&type_acc=5&id_acc=64)

[S15] : <https://www.franceagrimer.fr/Actualite/Filieres/Cereales/2016/Recolte-2016-de-cereales-a-paille-colza-et-pois-une-annee-hors-norme>

[S16] : <https://geco.ecophytopic.fr/adaptation-changement-climatique>

[S17] : <https://www.inrae.fr/actualites/ble-tendre-secheresse-nouvelles-varietes-venir>

[S18] : <https://www.agri71.fr/articles/12/08/2023/Face-au-climat-une-future-carte-des-fruits-encore-floue-92690/>

- [S19] : <https://www.perspectives-agricoles.com/recherche-agronomie/changement-climatique-les-transitions-loeuvre-dans-la-filiere-cerealiere>
- [S20] : <https://www.lafranceagricole.fr/moisson/article/870574/carte-interactive-decouvrez-vos-rendements-de-ble-tendre-en-2024-par-departement>
- [S21] : <https://biodiversite.gouv.fr/la-strategie-dans-les-oultre-mer>
- [S22] : <https://www.geves.fr/informations-toutes-especes/quelles-sont-les-reglementations/reglementations/>
- [S23] : <https://www.plantbreeding.uni-kiel.de/de/Research/11111>
- [S24] : <https://www.action-agricole-picarde.com/quelles-nouvelles-cultures-pour-diversifier-son-assolement>
- [S25] : <https://www.reussir.fr/des-plantes-exotiques-qui-sacclimatent-en-france-et-diversifient-les-cultures>
- [S26] : <https://agriculture.gouv.fr/infographie-les-semences-un-secteur-de-premier-plan-pour-la-france>
- [S27] : <https://www.geves.fr/expertises-varietes-semences/grandes-cultures/commercialisation-semences-certification/>
- [S28] : <https://www.terre-net.fr/mais-grain/article/221734/des-resultats-historiquement-bas-pour-la-production-de-mais-semences-2022>
- [S29] : <https://daaf.guadeloupe.agriculture.gouv.fr/l-envoi-de-vegetaux-de-la-guadeloupe-vers-la-france-et-les-autres-pays-de-l-a1199.html>
- [S30] : [https://cat.geves.fr/CAT\\_WEB/Data/PLABETTERAVESUCRIERE202001.pdf](https://cat.geves.fr/CAT_WEB/Data/PLABETTERAVESUCRIERE202001.pdf)
- [S31] : <https://irhs.angers-nantes.hub.inrae.fr/recherche/valorisation-de-la-diversite-des-pomoidees/projets-partenariats/projet-invite>
- [S32] : <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/seule-une-partie-de-leau-contenue-dans-le-sol-est-facilement-exploitee-par-les>
- [S33] : <https://www.geves.fr/qui-sommes-nous/ctps/>
- [S34] : <https://www.geves.fr/qui-sommes-nous/sev/etudes-dhs-vate/>
- [S35] : <https://www.fao.org/4/Y4391E/y4391e0a.htm#bm10>

## Conférences

[C1] : « Changement Climatique : dans quel contexte s'inscrit l'agriculture de demain ? » par Nathalie de Noblet-Ducoudré

[C2] : « Anticiper les changements climatiques et les risques sur les productions semencières - 1ers résultats de l'analyse des vulnérabilités des productions semencières au regard des évolutions climatiques » par Franck Prunus

[C3] : « Panorama des modèles de culture et leurs applications » par Philippe Debaeke

## Revue techniques

[R1] : « Dossier : Changement climatique : s'adapter sans se tromper » - Perspectives Agricoles - n° 509 - Avril 2023

[R2] : « Dossier - Légumineuses à graines : des inscriptions en nette augmentation en France » - Perspectives Agricoles - n° 492 - Octobre 2021

## **Annexe 1** : Lettre de cadrage de la saisine

**COMITÉ TECHNIQUE**  
**PERMANENT**  
**DE LA SÉLECTION**  

---

**C.T.P.S**

REPUBLIQUE FRANÇAISE  

---

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE

Monsieur le Président  
du Comité Scientifique du CTPS

Objet : Saisine du Comité Scientifique du CTPS sur le changement climatique

Pièce jointe : Termes de cadrage de la saisine « Changement climatique »

M. Le Président du Comité Scientifique du CTPS,

Cher Christian,

Je te prie de bien vouloir trouver ci-joint les termes de cadrage d'une saisine du Comité Scientifique du CTPS sur la thématique du changement climatique.

En effet, le changement climatique est une réalité qui frappe la société tout entière, et la production agricole en particulier.

En tant que Commission administrative à caractère consultatif, le CTPS est chargé de l'établissement du catalogue officiel des espèces et variétés de plantes cultivées. Les Sections mettent en œuvre des Règlements Techniques d'inscription au catalogue, et proposent des évolutions concernant les caractères à évaluer, les règles de décision ou les expérimentations à réaliser, pour inscrire aujourd'hui les variétés de demain. Ces travaux opérationnels s'inscrivent en pleine cohérence avec les ambitions portées par le plan Semences et Plants pour une Agriculture Durable 2, publié par le ministre de l'Agriculture en novembre 2021, qui reconnaît explicitement le rôle que jouent les variétés, semences et plants dans l'adaptation au changement climatique. A ce jour toutefois, peu de Règlements Techniques d'inscription ont été modifiés pour anticiper le bouleversement climatique auquel seront confrontés les producteurs dans les prochaines années, malgré l'intérêt manifesté pour cette thématique par de nombreuses sections.

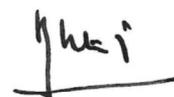
Par ailleurs, la base réglementaire européenne régissant la mise en marché de semences et plants est en cours de révision. La proposition de la Commission européenne, publiée le 5 juillet 2023, ambitionne d'explicitier l'adaptation au changement climatique comme critère de valeur culturelle et d'utilisation durable, épreuve qui serait imposée à toutes les espèces soumises à inscription au catalogue et non pas uniquement aux espèces agricoles et vigne.

C.T.P.S. – 25 rue Georges Morel – CS 90024 – 49071 BEAUCOUZE Cedex – France

Dans ce contexte, en déclinaison de l'action 26 du plan SPAD 2, je sollicite un éclairage de la part du Comité Scientifique sur la manière dont la prise en compte de l'adaptation au changement climatique pourrait être accélérée dans les travaux d'évaluation variétale pilotés par les Sections du CTPS.

Je souhaiterais que le Comité Scientifique rende ses conclusions en octobre 2024, pour guider les travaux de la prochaine mandature du CTPS.

Je te prie de croire, Cher Christian, en l'expression de ma sincère considération.



Alain Moulinier

Président du Comité Plénier du CTPS

## Annexe 2

### Questionnaire à l'attention des Sections et Commissions Inter-Sections du CTPS

-

### Etat des lieux des avancées des Sections et Commissions Inter-Sections en termes de prise en compte du changement climatique dans leurs travaux

Réponse attendue avant le 4 mars 2024, à renvoyer à [sarah.tozzo@geves.fr](mailto:sarah.tozzo@geves.fr)

Le Comité Plénier du CTPS a adressé une demande de saisine au Comité Scientifique du CTPS sur la thématique du changement climatique, avec pour objectif de définir comment mieux prendre en compte l'adaptation au changement climatique lors de l'inscription des variétés au Catalogue.

En effet, si la société dans son ensemble est concernée par le changement climatique, le secteur agricole l'est encore davantage et il est urgent de le prendre en compte pour se préparer à y faire face.

Selon le dernier rapport du GIEC, la température moyenne mondiale pour la période 2013-2022 est supérieure de +1.15°C à celle mesurée sur la période 1850-1900. En France, cette augmentation de température est même estimée à +1.9°C sur la dernière décennie.

Les conséquences du changement climatique sont déjà bien visibles, et il faut désormais s'attendre à des conditions climatiques plus extrêmes et plus imprévisibles : sécheresse, canicule, orages violents

...

Des modèles de projection permettent d'établir des climats analogues ; ainsi, en 2040, le climat de Paris pourrait correspondre à celui observé aujourd'hui en Nouvelle-Aquitaine, et en 2100 au climat actuel du sud de l'Espagne.

La saisine concerne l'ensemble du territoire français, c'est-à-dire la métropole mais également les territoires ultra-marins. Le Comité Scientifique souhaite aborder principalement les problématiques liées aux stress abiotiques (facteurs liés au milieu), mais les stress biotiques seront également abordés dans le rapport de saisine à travers la question de la capacité à anticiper des stress biotiques nouveaux, et la capacité de la plante à maintenir une résistance stable aux stress biotiques sous des contraintes abiotiques plus fortes. La saisine se focalisera sur la notion « d'adaptation » au changement climatique, mais il conviendra d'analyser si les orientations envisagées vont ou non dans le sens d'une atténuation du changement climatique (stratégie gagnant-gagnant).

C'est dans ce contexte que le questionnaire suivant vous est adressé ; il doit permettre au Comité Scientifique d'appréhender au mieux les enjeux et les impacts du changement climatique tels qu'ils sont perçus par l'ensemble des sections et commissions inter-sections du CTPS. Vos retours nous seront précieux pour rédiger le rapport de saisine et ainsi émettre des recommandations adaptées et réalistes. En effet, la diversité des situations des différents groupes d'espèces couverts par les sections, ainsi que la réflexion sur les Ressources PhytoGénétiques sont une véritable source d'enrichissement pour les travaux du Comité Scientifique.

Le Comité Scientifique laisse la liberté aux différentes sections et commissions inter-sections de répondre à ce questionnaire espèce par espèce, ou en regroupant les espèces au profil similaire.

Il est également vivement souhaité que ce questionnaire soit rempli par le plus de parties prenantes possible, afin d'avoir une vision d'ensemble des acteurs de la filière, *a minima* pour les questions fermées. Si les sections souhaitent synthétiser les réflexions et pistes échangées, le Comité Scientifique leur sera reconnaissant de bien vouloir joindre également les réponses individuelles et anonymisées des questionnaires qu'elles auraient pu recevoir en amont.

Questionnaire relatif au changement climatique et à sa prise en compte dans les travaux des sections du CTPS, adressé par le Comité Scientifique du CTPS

Section / CIS :  
.....

Espèce(s) concernée(s) par ce formulaire : .....

Catégorie du répondant (si réponse non consolidée par section) :

- Administration  Expert scientifique  Représentants des professionnels et des utilisateurs
- Représentants de l'interprofession  Représentants des obtenteurs de variétés
- Représentants des établissements producteurs de semences ou de plants
- Représentants des agriculteurs multiplicateurs de semences ou de plants
- Représentants des utilisateurs de semences ou de plants
- Représentants des utilisateurs de produits des récoltes obtenues à partir des semences ou plants
- Représentants des instituts techniques spécialisés ou assimilés

**Question 1 :** (à dupliquer dans son intégralité pour chaque espèce / groupe d'espèces)

En utilisant la liste ci-dessous, merci de :

- Classer les stress du moins impactant (1) au plus impactant (10 ou plus si rajout) sur la culture
- Estimer la fréquence à laquelle ce stress se rencontre actuellement (1 = 1 fois / 5 ans ou plus ; 2 = 1 fois / 2 à 5 ans ; 3 = 1 fois / 1 à 2 ans ; 4 = 1 fois / an ; 5 = plus de 1 fois / an)
- Indiquer si l'impact du stress peut être réduit par une réponse variétale
- Préciser quelles sont les incidences potentielles sur la culture (levée, floraison, remplissage des grains, récolte, qualité du produit ...) et les périodes de vulnérabilité

<b>Stress identifiés</b>	<b>Note d'impact</b>	<b>Fréquence</b>	<b>Réponse variétale mobilisable (O/N)</b>	<b>Incidences potentielles sur la culture et périodes de vulnérabilité</b> <i>(Dédoubler la ligne si plusieurs impacts ou périodes)</i>
Grêle				
Orage				
Vent				
Manque de précipitations				
Excès de précipitations				
Températures basses				
Températures élevées				
Pression des pathogènes existants				
Pression des autres bioagresseurs existants (insectes, adventices... préciser)				
Nouveaux pathogènes				
Déficit de rayonnement				
Augmentation du CO <sub>2</sub>				
Salinité				
Autre (à préciser)				
Autre (à préciser)				
Autre (à préciser)				
Autre (à préciser)				
Autre (à préciser)				

Pour chacun des 3 stress les plus impactants, comment les prenez-vous en compte dans vos analyses lorsqu'ils se produisent pendant les évaluations DHS et/ou VATE ?

Stress	Prise en compte lorsque celui-ci se produit sur une évaluation (ex : mise en place de pratiques curatives, notation du stress, abandon de l'essai, ...)

Qu'avez-vous mis en place pour sécuriser vos essais DHS / VATE face aux 3 stress les plus impactants ?

Stress	Mesures de sécurisation des essais

Avez-vous mis en place un pilotage actif dans vos réseaux d'essais ou dispositifs d'évaluation pour vous confronter volontairement à ces 3 stress les plus impactants ?

Stress	Mesures de pilotage actif des essais

Remarques et commentaires :

## Question 2 :

Selon vous, en utilisant les grilles de notation proposées, quelles sont les pratiques culturales (au champ ou en environnement contrôlé) qui ont évolué au cours des 30 dernières années ? Pour chacune de ces évolutions, quelle est la part attribuable au changement climatique déjà à l'œuvre ?

Grilles de notation :

Note attribuée	Explication du changement
NA	Sans objet
0	Pas de changement
1	Changement mineur, anecdotique
2	Changement modéré
3	Changement majeur

Note attribuée	Explication de l'attribution au changement climatique
NA	Sans objet
0	Pas de lien avec le changement climatique
1	Influence mineure du changement climatique
2	Influence importante du changement climatique
3	Importance majeure du changement climatique

	Note de changement observé chez les producteurs	Note de changement observé dans les dispositifs d'évaluation CTPS	Attribution au changement climatique	Commentaires
Apports organiques				
Fertilisation minérale				
Travail du sol				
Date de semis / plantation				
Opérations de taille				
Désherbage				
Traitements herbicides				
Traitements fongicides				
Traitements insecticides				
Irrigation				
Récolte				
Couverts végétaux				
Cultures en mélange (intra ou interspécifique)				
Diversification et nouvelles espèces				
Drainage				

Rotation des cultures (fréquence de rotation, augmentation/diminution de certaines espèces dans l'assolement...)				
Protection contre l'érosion des sols (arrêt du labour fréquent, choix de parcelle non en pente, implantation de bande enherbées dans les allées de essais pour limiter l'écoulement de l'eau...)				
Modification d'éclairage en environnement contrôlé				
Modification de la composition de l'atmosphère en environnement contrôlé				
Modification de la température en environnement contrôlé				
Autre (à préciser)				
Autre (à préciser)				
Autre (à préciser)				

Selon vous, en utilisant ces mêmes grilles, les zones de production et d'évaluation des variétés ont-elles évolué ces 30 dernières années ?

	Note de changement observé chez les producteurs	Note de changement observé dans les dispositifs d'évaluation CTPS	Attribution au changement climatique	Commentaires
Modification des zones géographiques (latitude, altitude, climat océanique/continental/tropical/...)				

**Question 3 :**

Rencontrez-vous des difficultés liées au changement climatique lors des cycles DHS / VATE ? (aléas, données inhabituelles ou hors-norme ...)

Si oui, quelles sont les solutions déjà proposées, en cours de réflexion ou à l'étude ?

Des instabilités climatiques ont-elles fortement impacté la réussite des essais et donc le fonctionnement de vos réseaux ces dernières années ? Ces phénomènes semblent-ils être en augmentation ? Comment avez-vous fait pour vous adapter à cela ?

Avez-vous décelé des tendances à l'instabilité des comportements/résultats variétaux depuis plusieurs années, et si oui avez-vous des hypothèses quant à un lien avec des évolutions climatiques ?

**Question 4 :**

Dans le contexte du changement climatique, quelles sont selon vous les anticipations qu'il faut prévoir dès à présent en termes de traits de sélection ?

Traits	Traits critiques pour le changement climatique déjà sous sélection (Oui / Non)	Traits critiques pour le changement climatique non travaillés en sélection (Oui / Non)	Nécessité de nouveaux critères VATE pour intégrer le changement climatique ?	Remarques
Absorption minérale (N, P, K)				
Amélioration du potentiel de rendement				
Amélioration du stockage et de la remobilisation du glucose				
Aptitude à la culture en mélange				
Aptitude au semis précoce				
Aptitude au semis tardif				
Architecture racinaire				
Besoins en °C/J				
Capacité à rester vert				
Efficacité de l'utilisation de l'eau				
Floraison précoce				
Floraison tardive				
Interception de la lumière				
Maintien de la qualité des produits				
Modification de la composition des récoltes (sucres, protéines ... à préciser)				
Maturité précoce				
Maturité tardive				
Nature / qualité des fibres				
Microbiome racinaire				
Résistance à la montaison				
Résistance à la stagnation en eau				
Résistance au gel				
Résistance au gel tardif				
Résistance aux maladies				
Résistance aux oiseaux				
Résistances aux ravageurs				
Respiration nocturne				

Sensibilité à la photopériode				
Tolérance à la chaleur				
Tolérance à la sécheresse				
Vigueur au stade précoce				
Autre (à préciser)				
Autre (à préciser)				
Autre (à préciser)				
Autre (à préciser)				

**Question 5 :**

Pensez-vous que les espèces de votre section peuvent contribuer à l'atténuation du changement climatique ? Si oui, comment ? Et quelles sont les traits à sélectionner et à observer lors de l'évaluation variétale dans ce contexte ? (Si ces traits sont à considérer en lien avec une conduite agronomique particulière, merci de le préciser)

**Question 6 :**

Existe-t-il des « opportunités » apportées par le changement climatique pour les espèces de votre section ? Si oui lesquelles ?

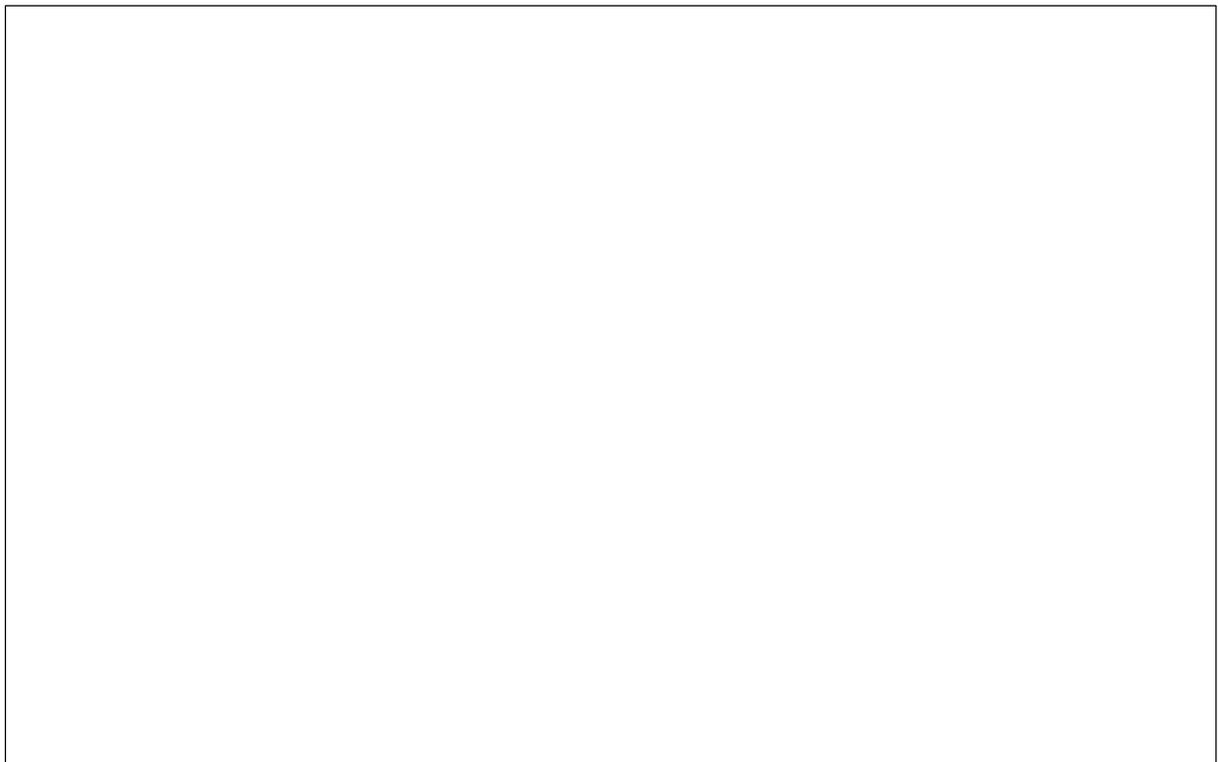
**Question 7 :**

Quels sont, pour les espèces de votre section, les craintes, verrous, freins ou difficultés limitant la prise en compte de l'adaptation au changement climatique dans les travaux d'évaluation variétale pour l'inscription au catalogue ?



**Question 8 :**

Quels sont les outils (OAD, modèles de culture...) et travaux de recherche dont vous avez connaissance sur vos espèces, qui pourraient être mobilisés en lien avec le changement climatique ?



**Question 9 :**

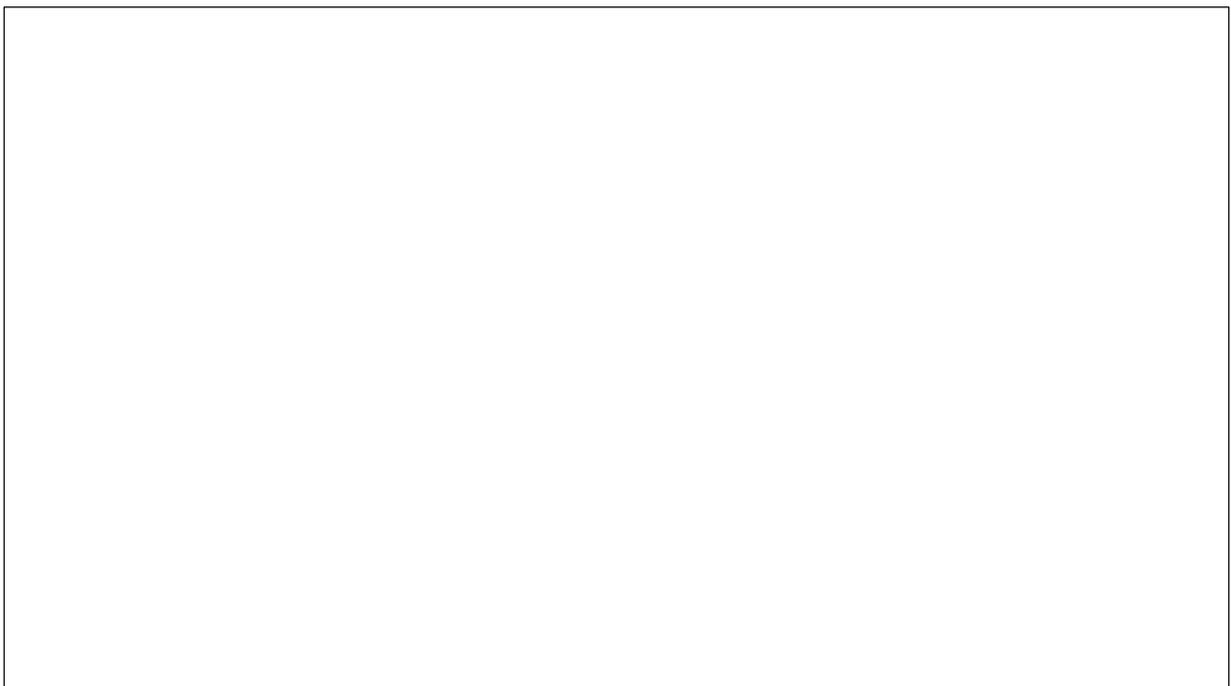
Quels seraient, selon vous, les impacts du changement climatique sur la conservation *in situ* des ressources phytogénétiques de votre groupe d'espèces ?



**Question 10 :**

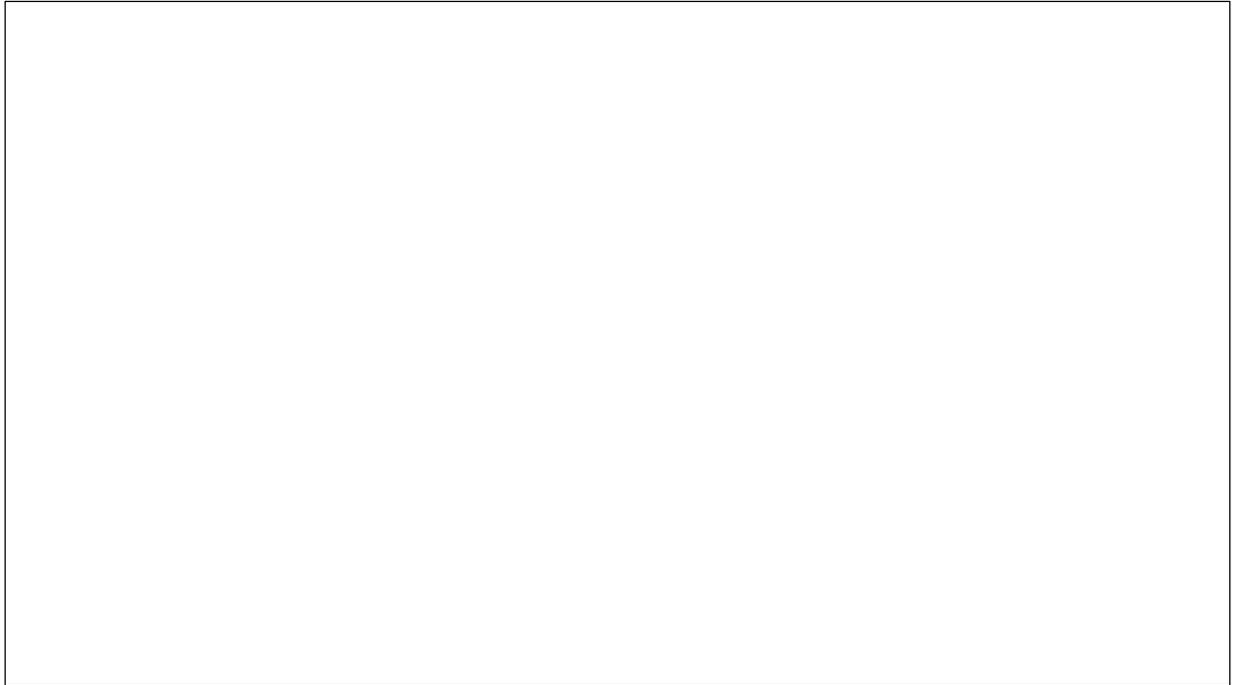
Le changement climatique s'accompagne d'attentes et de contraintes sociétales qui vont également impacter l'agriculture de demain. En effet, il va falloir partager la ressource en eau, intégrer les coûts en énergie fossile, voire réinterroger certaines pratiques (serres chauffées, irrigation ...).

Quels sont les risques que vous identifiez sur ces aspects sociétaux en lien avec le changement climatique concernant les cultures de votre section ?



**Question 11 :**

Avez-vous des remarques à transmettre au Comité Scientifique ?

A large, empty rectangular box with a thin black border, intended for the respondent to write their remarks to the Scientific Committee.