Fiche connaissance

Impacts du changement climatique sur les cultures

Objectifs :

- ✓ Proposer un socle de connaissances sur les interactions entre changement climatique, ressources en eau et agriculture
- ✓ Indiquer des ressources pertinentes pour préciser ces effets, y compris des effets régionaux spécifiques

1. Structure de la fiche

Les éléments inclus dans cette fiche servent de préalable à toute étude prospective sur le sujet, pouvant être mise en œuvre par les autorités publiques.
Ce document rassemble différents éléments :

- Un rappel des grands principes d'agronomie ;
- Une revue des effets du changement climatique sur la ressource en eau et les systèmes agricoles ;
- Une revue des effets « rétroactifs » de l'agriculture, à la fois sur le climat et sur la ressource en eau ;
- Un ensemble de références bibliographiques permettant d'approfondir les conclusions données dans cette fiche.

Les interactions entre le climat, la ressource en eau et les systèmes agricoles sont complexes. En effet, plusieurs effets, parfois antagonistes, se cumulent ; tandis que l'agriculture a des effets rétroactifs, à la fois sur la ressource en eau (utilisation de la ressource en eau pour l'irrigation, quantité d'eau drainée en profondeur) et les conditions pédoclimatiques locales (rafraichissement de l'air par évapotranspiration). Le schéma ci-dessous résume ces interactions, ainsi que les parties du document qui les explicitent :

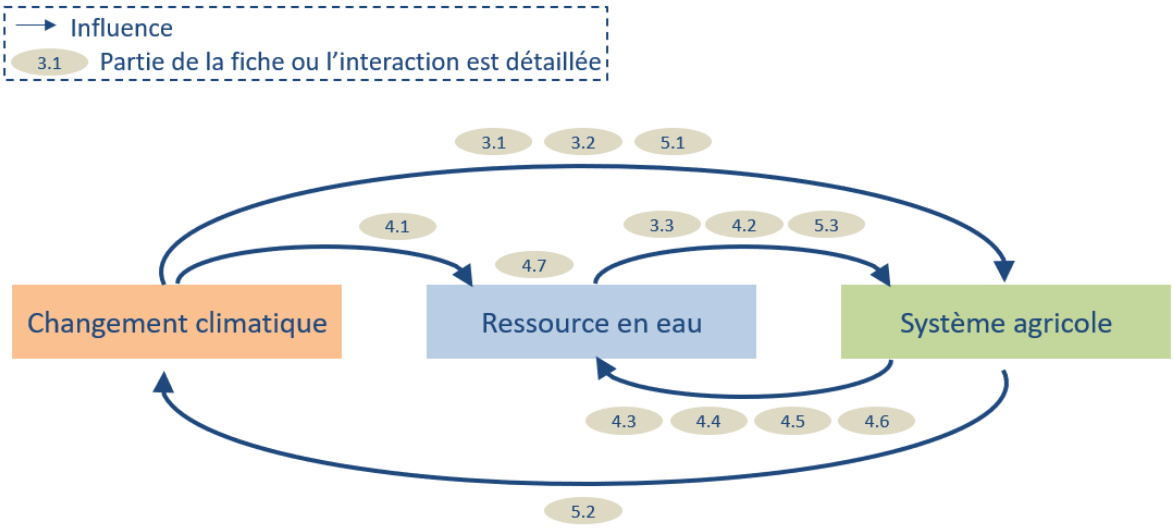

Figure 1: Présentation de la structure de la fiche

2. Impacts de la modification de la température

Le changement climatique provoque l'élévation de la température moyenne. Pour plus de détails sur les scénarios climatiques, se référer à la fiche « scénarios climatiques ».

3.1. Rappel des interactions entre croissance des plantes et température

La vitesse de développement des plantes est directement liée à la température, selon plusieurs facteurs :

- La plante croît à partir d'une **température minimale**, appelée le **« zéro de végétation ».** Il est variable selon les espèces considérées (0°C pour le blé, 10°C pour la vigne par exemple) ;

- Les plantes connaissent plusieurs stades de croissance, comme le montre le schéma figure 2. Le passage d'un stade à l'autre est déterminé par l'atteinte d'une **somme de « Jours-Température »** : autrement dit, le passage d'un stade à l'autre est proportionnel à la température multipliée par la durée. Ainsi, l'augmentation des températures a pour effet un passage plus rapide des plantes d'un stade à l'autre, effet nommé « **raccourcissement du cycle** ».
- Il existe un optimum de température, au-delà duquel la température ne permet plus d'accélérer le développement des plantes, et où elle a au contraire un effet délétère sur celles-ci (~30°C).

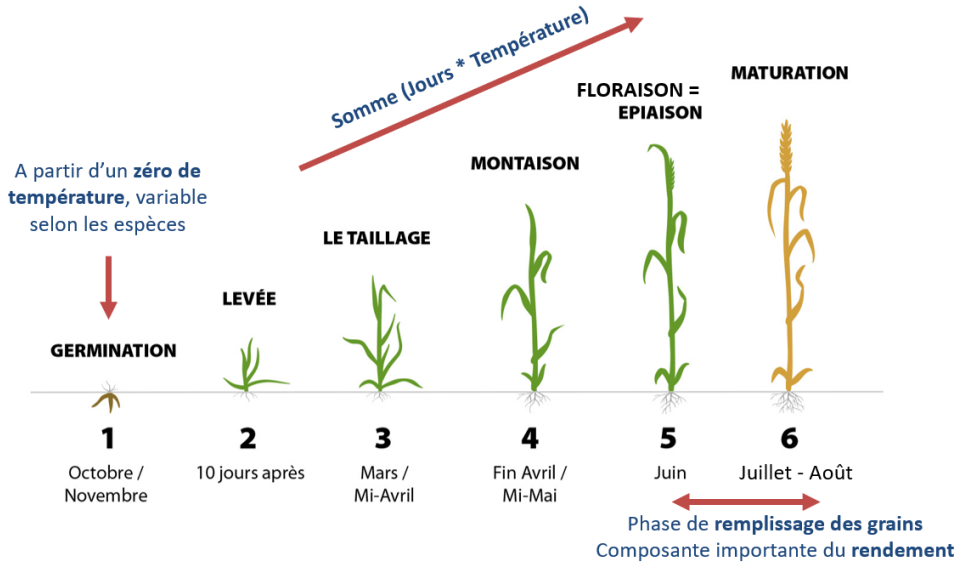

Figure 2: Schéma de développement d'un blé

En effet, il existe deux grands types de cultures :

- Les cultures d'hiver : semées à l'automne et récoltées entre juin et juillet. Leur période végétative se situe donc pendant l'hiver et en début de printemps.
- Les cultures de printemps : semées entre mars et avril et récoltées entre Août et Octobre.

Les effets précocité et de raccourcissement des cycles culturaux, mentionnés précédemment, sont plus importants sur les cultures de printemps que sur les cultures d'hiver. En effet, les cultures d'hiver ont une période de croissance végétative en fin d'hiver et au début du printemps, au moment où la **photopériode** (rapport entre la durée du jour et de la nuit) est limitante.
En revanche, pour les cultures de printemps, la photopériode n'est pas limitante vu l'allongement de la durée du jour : c'est donc le paramètre **température** qui détermine le passage d'un cycle à l'autre.

3.2. Effets d'une hausse de la température sur la croissance des plantes

La hausse de la température provoquée par le changement climatique a plusieurs effets sur le cycle de développement des plantes[1] :

- Effet sur la **précocité des plantes** : le fait que le zéro de température soit atteint plus tôt dans l'année provoque une avancée des cycles culturaux.

Exemple : En Franche-Comté, en 2011, la floraison des céréales est intervenue avec 15 jours d'avance par rapport à la moyenne des 20 dernières années. Le maïs en monoculture serait récolté avec un mois d'avance dans un futur proche et un mois et demi d'avance dans un futur lointain.[2]

[1] Brisson N., Levrault F., 2012, Livre vert du projet CLIMATOR : 2007 – 2010, Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces, ADEME, INRA

[2] ANR, INRA, et ADEME, « Climator - Introduction », in *Livre vert du projet CLIMATOR: 2007-2010 : changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces* (Angers: ADEME, 2012); ADEME Franche-Comté, « Adaptation au changement climatique en Franche-Comté - Filières des productions végétales Cultures et Vignes », septembre 2014, https://www.bourgogne.ademe.fr/sites/default/files/adaptation-changement-climatique-cultures-vignes.pdf.

- Effets sur la **durée des cycles :** Le passage d'un stade de développement d'une plante à un autre étant proportionnel à la somme de la durée (en jours) multipliée par la température, le passage d'un stade à l'autre s'opère plus vite dans des conditions ou les températures sont plus chaudes. Dans certains cas, le **raccourcissement du cycle** a un **effet négatif sur les rendements**. Cela est lié au fait que la plante passe au stade suivant alors que ses organes (les épis ou grains) continuent de croître à la même vitesse.

- Dans certain cas, la **température passe au-delà de l'optimum** : Ce passage peut provoquer des problèmes d'échaudage (brûlures de plantes). D'autres cas existent pour certaines espèces, dont la floraison ne s'opère qu'à des températures basses : dans ces cas-là, une baisse de la fertilité est observée.

Exemple (suite) : Plus précisément, les effets du changement climatique sur les rendements de maïs grain (variété Méribel (pour un sol brun peu lessivé tronqué, de 140 cm de profondeur avec une réserve utile de 226 mm et un taux de matière organique de 1,8%) entre présent (PR), FP (futur proche) et FL (futur loin)) ont été calculés par le projet CLIMATOR sur les 3 régions de Colmar, Dijon et Mirecourt, et sont affichés en Figure 3.
De la même manière, le changement cliamtique devrait entraîner une diminution des risques de gel dans le futur à l'automne et l'hiver. Ceci est une aubaine pour le développement du colza dans la zone Nord-Est de la région.

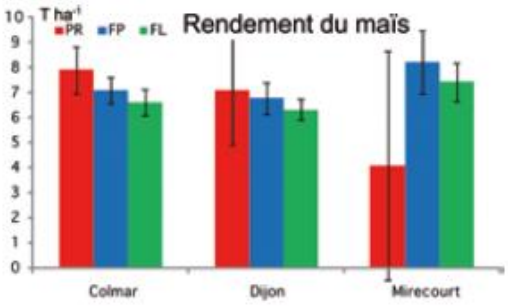

Figure 3 : Evolutions du rendement entre présent (PR), futur proche (FP), futur lointain (FL). Source : Climator

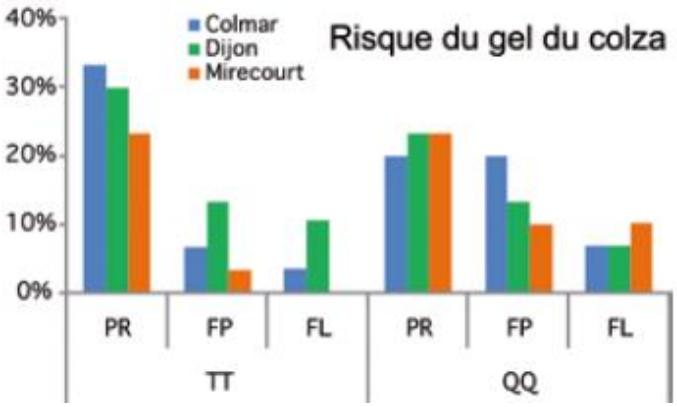

Figure 4: Evolution des risques de gel létal du colza pour 2 méthodes de régionalisation du climat (cf. fiche scénarios climatiques), selon le présent (PR), futur proche (FP) et futur lointain (FL). Source : Climator.

3.3. Effets d'une hausse de la température sur les besoins en eau des plantes

Les plantes évaporent une partie de l'eau qu'elles ingèrent par le feuillage. Cette évaporation est appelée également l'évapotranspiration, et permet aux plantes de maintenir leurs organes à une température adéquate.

Par conséquent, plus il fait chaud, plus les plantes ont besoin d'évapotranspirer pour maintenir leur température : autrement dit, une augmentation de la température accroît les besoins en eau des plantes.
La quantité totale d'eau évapotranspirée par une plante située en conditions non limitantes en eau est appelée **demande évaporative** (également notée ETM).

A noter que l'évapotranspiration augmente également avec le stade de développement des plantes : ainsi, une plante adulte évapotranspire d'avantage qu'une plantule.

Exemple : Les besoins en irrigation augmentent pour le maïs, dans un scénario « optimiste » du changement climatique, et ce partout en France, en futur proche (FR) ou lointain (FL), comme le montre la Figure 5.

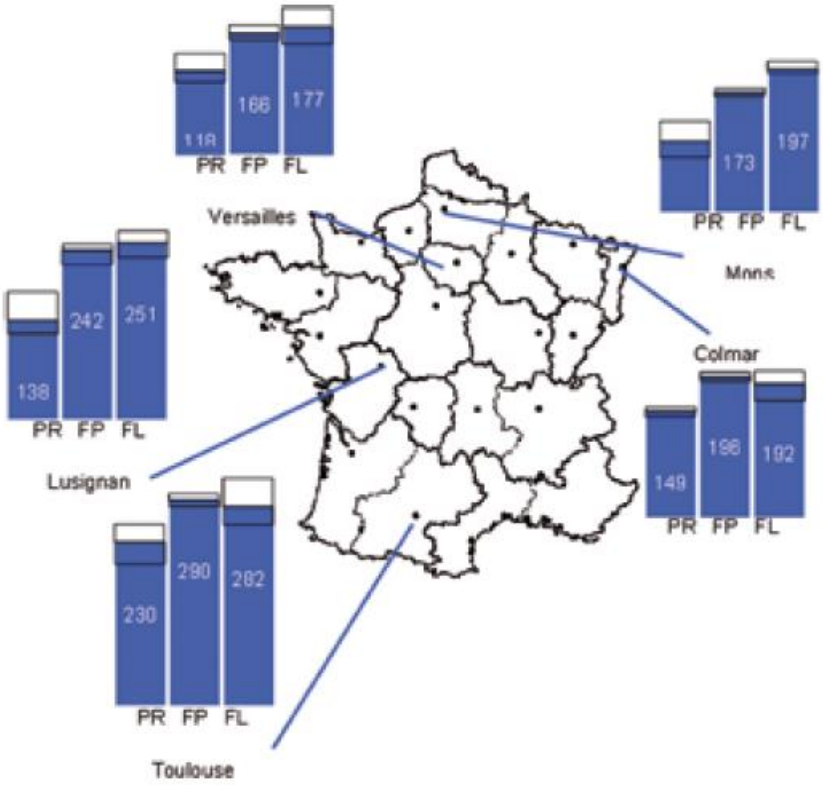

Figure 5: Evolution des besoins en irrigation d'une culture de maïs au cours du XXIème siècle, selon le scénario A1B (cf. fiche scénarios climatiques). Source : Climator.

3. Modification de la pluviométrie et par conséquent de la ressource en eau

Les impacts du changement climatique sur la pluviométrie sont plus incertains que ceux de la température. Pour d'avantage d'éléments, se référer à la fiche « Scénarios climatiques ».

4.1. Effet de la pluviométrie sur la ressource en eau

La diminution de la pluviométrie affecte de différentes manières la ressource en eau :

- **Diminution du débit des cours d'eau (hydrologie superficielle)** : Les cours d'eau superficiels sont alimentés à la fois par la fonte des neiges, et par les eaux qui ruissellent horizontalement après une pluie ;

- **Diminution du remplissage des réserves utiles des sols :** La réserve utile d'un sol est la quantité d'eau qu'un sol est capable de retenir après une pluie, et qui est prélevable par les plantes. La diminution de la pluviométrie provoque une baisse des apports en eau, en particulier pour les cultures non irriguées qui sont entièrement dépendantes des précipitations (dites cultures « **pluviales** ») ;

- **Diminution des taux de remplissage des nappes phréatiques :** Les nappes phréatiques sont des nappes d'eau présentes en profondeur. Après une pluie, l'eau qui n'est pas retenue dans le sol (l'eau « en trop » par rapport à la réserve utile) ruisselle en profondeur et vient recharger les nappes.

Selon la saison, un déficit de pluviométrie n'affectera pas de la même façon la ressource en eau :

- **Au printemps et en été** : Il s'agit de la pleine saison de croissance des plantes. Ainsi, le déficit de pluviométrie se manifestera par des réserves utiles de sols insuffisamment remplies en comparaison

avec les besoins des cultures. Par ailleurs, l'été est la période où les débits des cours d'eau superficiels sont les plus faibles (période également appelée « étiage »).
Ce type de déficit est appelé « **sécheresse édaphique** ».

- **A l'automne et en hiver** : Les pluies sont plus nombreuses et plus fréquentes. Ainsi, les réserves utiles sont généralement rapidement remplies, et ceci d'autant plus que les plantes ont moins de besoins en eau à cette saison (comme expliqué dans le paragraphe 4.2).
  Ainsi, après une pluie, une plus grande proportion de l'eau est en mesure de ruisseler en profondeur. Cette saison est ainsi celle du **remplissage des nappes phréatiques**. Un déficit de pluviométrie à cette saison provoquera une baisse du niveau de la nappe.
  Ce type de déficit est appelé « **sécheresse hydrologique** ».

4.2. Effets du manque d'eau sur les plantes

Le manque d'eau affecte les plantes à différents niveaux de leur métabolisme.

Les stomates sont des organes végétaux situés au niveau de l'épiderme des feuilles, qui régulent les échanges gazeux entre l'intérieur des feuilles et l'air ambiant. L'ouverture et la fermeture des stomates permettent de réguler ces échanges, ainsi que l'évapotranspiration.
Ainsi, une première réponse des plantes au manque d'eau est de fermer les stomates, ce qui permet de limiter les pertes d'eau par évapotranspiration.

Toutefois, cette stratégie d'adaptation a un effet délétère sur le rendement. En effet, c'est par les stomates que les échanges gazeux ont lieu, qui permettent aux plantes de récupérer du CO_2 de l'air et d'émettre de l'O_2. Lorsque les stomates sont fermés, de l'oxygène s'accumule dans les organes des plantes, et stoppe les réactions chimiques de photosynthèse[3].

D'autres impacts négatifs sont notés, en particulier sur la germination et l'efficacité de l'assimilation de l'azote. En revanche, un léger stress hydrique contrôlé peut avoir des impacts positifs sur la qualité de certaines productions (maraichage, arboriculture).

4.3. Effet des plantes sur la ressource en eau superficielle (réserve utile)

Comme expliqué précédemment, les plantes ont besoin d'eau pour évapo-transpirer. Pour cela, elles prélèvent une partie de l'eau contenue dans le sol. Ainsi, pour comprendre le lien entre les plantes et le cycle de l'eau, il est nécessaire de comprendre comment les sols stockent de l'eau.

Après une pluie, le sol s'imprègne d'eau jusqu'à un certain seuil, appelé « capacité au champ ». Il s'agit de la quantité d'eau maximale que le sol est capable de retenir. Au-delà de ce seuil, l'eau est drainée vers les profondeurs, et participe à la recharge des nappes phréatiques ou bien s'écoule latéralement par ruissellement.

A l'inverse, il existe un seuil d'humidité du sol en deçà duquel les plantes ne sont pas capables de prélever l'eau qui y est contenue. Ce seuil est appelé « point de flétrissement permanent ».

Le terme « réserve utile », désigne la différence entre la quantité d'eau contenue dans le sol à capacité au champ et celle qui y est contenue au point de flétrissement permanent. Autrement, c'est la capacité maximale d'eau contenue dans le sol prélevable par les plantes.
Le taux de remplissage de la réserve utile est ainsi le résultat du calcul suivant :

$$Taux\ de\ remplissage\ de\ la\ réserve\ utile\ (jour\ n)\ \ (en\ \%)$$

$$= \frac{(Quantité\ d'eau\ contenue\ dans\ le\ sol - Quantité\ d'eau\ à\ capacité\ au\ champ)}{Réserve\ utile\ (Quantité\ d'eau\ à\ capacité\ au\ champ - Quantité\ d'eau\ au\ point\ de\ flétrissement\ permanent)}$$

[3] Brisson N., Levrault F., 2012, Livre vert du projet CLIMATOR : 2007 – 2010, Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces, ADEME, INRA

4.4. Effet des plantes sur la ressource en eau profonde (nappes phréatiques)

Comme expliqué précédemment, lors d'une pluie, l'eau en surplus est drainée vers les nappes phréatiques. Or, les couverts végétaux retiennent une part différente de l'eau de pluie. En moyenne, sur l'ensemble du territoire français, seulement un tiers de l'eau de pluie ruisselle vers les nappes[4], tandis que les deux tiers restants sont retenus dans les sols. Une partie sera utilisée par les plantes, tandis qu'une partie sera retenue dans les sols et non prélevable. Toutefois, cela dépend beaucoup du type de couverts : un sol nu est d'avantage drainant qu'une grande culture, et encore d'avantage qu'une prairie ou une forêt.

Cet effet est à garder en tête, dans le cadre d'un pilotage de la ressource en eau à l'échelle d'un bassin versant.

4.5. Effets des pratiques culturales sur la ressource en eau : irrigation

L'irrigation consiste à apporter de l'eau aux plantes, afin de compléter les apports de la pluviométrie. La majeure partie de la surface agricole utilisée (SAU) est occupée par des cultures pluviales. En 2016, 5% de la SAU française était irriguée, soit environ 1,4 million d'hectares[5]. Cette part baisse depuis 2010, du fait de l'augmentation des surfaces artificialisées[6] et des surfaces boisées[7].
Ces chiffres cachent une forte disparité régionale (moins de 1% des surfaces sont irriguées en Bourgogne Franche Comté, Bretagne et Normandie, tandis que 14% le sont en Provence-Alpes Côtes d'Azur), et selon les types de cultures (à ce jour, 52% des surfaces irriguées sont occupées par du maïs), comme le montrent les deux figures ci-dessous :

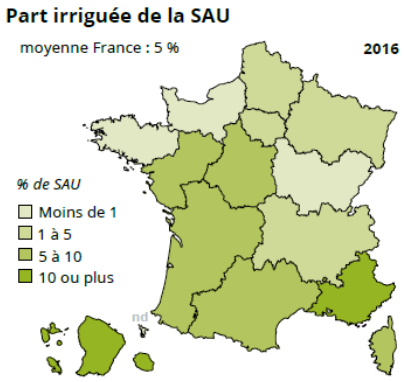

Figure 6: Part irriguée de la SAU par région (Source : Agreste - Enquêtes structures 2016)

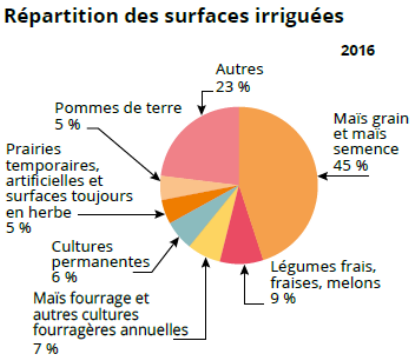

Figure 7: Répartition des surfaces irriguées selon les cultures (Source : Agreste - Enquêtes structures 2016)

L'eau d'irrigation provient des nappes phréatiques et des cours d'eau superficiels. Ainsi, le choix d'irriguer (intimement lié au choix des espèces cultivées) ainsi que les techniques d'irrigation choisies ont un impact direct sur la ressource en eau.

4.6. Effets des pratiques culturales sur l'eau disponible pour les plantes : travail du sol et réserve utile

[4] Amigues J.P., P. Debaeke, B. Itier, G. Lemaire, B. Seguin, F. Tardieu, A. Thomas (éditeurs), 2006. Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. Expertise scientifique collective, Rapport, INRA (France), 380 pages + annexes

[5] Agreste 2020, Graph'Agri 2020, L'agriculture, la forêt, la pêche et les industries agroalimentaires

[6] INSEE. 2019. « Artificialisation des sols − Indicateurs de richesse nationale ». 12 2019. https://www.insee.fr/fr/statistiques/3281689?sommaire=3281778#tableau-figure1

[7] Institut National de l'Information Geographique et Forestière. 2019. « Le Mémento: Inventaire Forestier ». https://fr.calameo.com/read/00118858223442f45bd21?page=1.

Comme expliqué dans le paragraphe « 4.1. Effet de la pluviométrie sur la ressource en eau », la quantité d'eau que les sols retiennent et que les plantes peuvent absorber est appelée « réserve utile ».
Cette quantité dépend des caractéristiques du sol. Certains paramètres, comme la nature du sol (sableux, limoneux, argileux) ne permettent pas aux agriculteurs de s'adapter. En revanche, certaines pratiques agricoles ont un impact direct sur les caractéristiques du sol (porosité, teneur en matière organique), et peuvent permettre d'augmenter la réserve utile des sols, comme par exemple le non labour ou les cultures intermédiaires.

4.7. Principes du bilan hydrique des plantes

La compréhension des principes d'évapotranspiration et de réserve utile permettent de formaliser le confort hydrique des plantes en créant des modèles quantitatifs.

Ces modèles reposent sur le principe suivant : comparer les apports en eau des plantes (contenue dans le sol : réserve utile, par la pluie ou par de l'irrigation) avec les besoins en eau des plantes.

Ces besoins en eau sont calculés grâce aux étapes suivantes :

- Tout d'abord, on calcule l'évapotranspiration potentielle, appelée ETP0 ou ETP. Il s'agit de la quantité d'eau évapotranspirée par un couvert standart (une prairie). Cette quantité ne dépend que des conditions climatiques externes : humidité de l'air, vent, ensoleillement, température.
- Dans un second temps, on calcule l'évapotranspiration maximale (ETM). Il s'agit de la quantité d'eau évapotranspirée, en supposant la réserve utile du sol remplie et l'eau non limitante.
  L'ETM a la valeur de l'ETP0, multiplié par un coefficient appelé « Coefficient cultural » (Kc). Ce coefficient permet de prendre en compte le stade de développement des cultures dans la quantité d'eau requise pour la croissance : en effet, une plantule évapotranspire moins qu'une plante adulte.
- Enfin, l'évapotranspiration réelle (ETR) désigne la quantité d'eau réellement évapotranspirée par la plante, en tenant compte du fait que la réserve utile n'est pas toujours remplie à 100%.

A partir de ces trois indicateurs, plusieurs approches co-existent pour évaluer l'adéquation entre la quantité d'eau disponible et le besoin des plantes[8] :

- Le rapport ETR/ETM pendant la période de production est appelé « confort hydrique des plantes ».
- Le rapport ETR – ETM est, quant à lui, appelé « déficit hydrique ». Il représente le besoin potentiel en irrigation (en supposant qu'il n'y a pas d'apport lié à la pluie).
- Une modélisation du taux de remplissage de la réserve utile peut être faite à partir de l'équation suivante :

$$Quantité\ d'eau\ contenue\ dans\ la\ réserve\ utile\ (jour\ n) = Quantité\ d'eau\ contenue\ dans\ la\ réserve\ utile\ (n-1) + Pluie - Ruissellement - Drainage - Evapotranspiration$$

En l'absence de données sur l'évapotranspiration réelle, l'évapotranspiration maximale est utilisée dans ce calcul, et permet de voir si la réserve utile est suffisante pour assurer l'intégralité du besoin.

5. Effets combinés de l'eau et de la température

5.1. Effets de la pluviométrie et de la température sur les ravageurs

L'augmentation de la température et la diminution de la pluviométrie, provoqués par le changement climatique, ont plusieurs conséquences sur les ravageurs des cultures, résumé dans le tableau ci-dessous[3] :

Tableau 1: Présentation des effets du changement climatique sur les ravageurs

Effets	Impacts négatifs	Impacts neutres pour l'agriculture	Impacts positifs

[8] Brisson N., Levrault F., 2012, Livre vert du projet CLIMATOR : 2007 – 2010, Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces, ADEME, INRA

Diminution de l'humidité atmosphérique et des précipitations	Plantes affectées par la sécheresse peuvent être plus sensibles aux maladies Impact des adventices plus marqué en raison d'une plus forte compétition sur l'eau		Sécheresse compromet le développement des œufs et larves de ravageurs Sécheresse est défavorable au développement de maladies cryptogamiques (= fongiques)
Augmentation de la température	Accélération du cycle de développement des ravageurs	Effets variables sur les pathogènes du sol (et les maladies telluriques)	

A noter enfin que des plantes affaiblies par la sécheresse peuvent être plus sensibles aux maladies.

5.2. Effet des plantes sur l'eau et la température

Comme expliqué dans le paragraphe 3.3, les plantes évapotranspirent une grande partie de l'eau qu'elles récupèrent dans le sol. Ce faisant, elles contribuent à rafraichir l'air autour d'elles.
Ainsi, une stratégie d'économie d'eau qui viserait à limiter l'évapotranspiration aurait une double-conséquence, à fois sur la baisse des rendements, mais contribuerait également à augmenter la température.

5.3. Effets des modifications de pluviométrie et de température : augmentation des épisodes de sécheresse

Les plantes les plus sensibles à la sécheresse sont les plantes de printemps. En effet, elles sont soumises à des stress hydriques en fin de printemps et en été, à une période où elles sont en pleine croissance végétative. La période entre la floraison et la récolte est souvent la plus critique, car détermine directement le rendement (stade de développement des fruits, de remplissage des grains).

Plusieurs adaptations à la sécheresse sont possibles[9] :

- **Stratégie d'esquive** : Il s'agit de déplacer les cycles culturaux des plantes, de sorte à ce qu'elles soient soumises à des demandes évaporatives plus faibles.
  Cette stratégie peut se traduire de deux façons :
  - **Choix de variétés plus précoces** : Grâce à une sélection variétale favorisant les plantes résistantes au froid ;
  - **Choix de variétés à cycles plus courts** : Cela implique en revanche un rendement maximal moins important car le rayonnement intercepté est forcément plus faible, si la croissance se fait sur une durée plus courte.
- **Stratégie d'évitement** : Il s'agit de limiter l'évapotranspiration. Plusieurs procédés permettent d'atteindre cet objectif :
  - **Développement racinaire accru** : Uniquement si celui-ci permet à la plante d'accéder à des ressources en eau supplémentaire
  - **Limitation de la croissance foliaire et des organes aériens** : Cette adaptation a en revanche un impact sur le rendement maximum pouvant être atteint par les plantes.
- **Amélioration de l'efficience de l'eau** : Il s'agit d'augmenter le rapport entre la quantité de biomasse produite et la quantité d'eau transpirée. Cette stratégie peut être atteinte par sélection variétale.

Il est à noter que le changement climatique a déjà un effet de rendre les plantes plus précoces et de raccourcir leurs cycles culturaux. Autrement dit, le changement climatique contribue en partie à adapter les plantes, bien que ces effets ne soient pas suffisants à adapter les plantes.

[9] Amigues J.P., P. Debaeke, B. Itier, G. Lemaire, B. Seguin, F. Tardieu, A. Thomas (éditeurs), 2006. Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. Expertise scientifique collective, Rapport, INRA (France), 380 pages + annexes

6. Pour aller plus loin

Logo	Nom	Détails
	Expertise collective INRA : Sécheresse et agriculture : Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. Expertise scientifique collective. Synthèse du rapport - INRA - Institut national de la recherche agronomique (archives-ouvertes.fr)	Revue de l'ensemble des effets des sécheresses sur les plantes. Description des différents types de sécheresses et stratégies physiologiques d'évitement.
	Livre vert du projet CLIMATOR : 2007 – 2010, Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces - La librairie ADEME	Impacts détaillés du changement climatique sur les plantes, sur la ressource en eau. Fiches de synthèse des différents effets par espèce et par région française.