



CLIMAT
AGROCLIMAT
IMPACTS
ADAPTATIONS
ATTENUATIONS

AGRICILES



oracle

Centre Val-de-Loire

Etat des lieux sur le changement climatique
et ses incidences agricoles
en région Centre Val-de-Loire

Edition mars 2020

1 CHANGEMENT CLIMATIQUE



Observatoire Régional sur l'Agriculture et le Changement cLimatiquE

Avec le soutien financier de :

ADEME DR Centre Val-de-Loire
Agence de l'Eau Loire Bretagne
Agence de l'Eau Seine-Normandie
Chambre Régionale d'Agriculture de Centre Val-de-Loire
Conseil Régional Centre Val-de-Loire

Comité de pilotage :

ADEME DR Centre Val-de-Loire
Agence de l'Eau Loire Bretagne
Agence de l'Eau Seine-Normandie
BRGM
Chambre Régionale d'Agriculture de Centre Val-de-Loire
Conseil Régional de Centre Val-de-Loire
DRAAF Centre Val-de-Loire
DREAL Centre Val-de-Loire
Météo France DIR Centre

Direction éditoriale et expertise agronomique

Chambre Régionale d'Agriculture de Centre Val-de-Loire

Données et expertise climatiques

Météo France



Contributions :

Chambre Régionale d'Agriculture de Centre Val-de-Loire,

Documents téléchargeables sur :

www.centre-valde Loire.chambres-agriculture.fr

Edition 2020

1 CHANGEMENT CLIMATIQUE



Observatoire Régional sur l'Agriculture et le Changement climatique

Qu'est-ce qu'ORACLE Centre Val-de-Loire ?

ORACLE Centre Val-de-Loire est un Observatoire Régional sur l'Agriculture et le Changement climatique. Il établit un constat objectif du changement climatique et de ses conséquences avérées sur l'activité agricole régionale. Il s'appuie sur des observations qui sont mises à jour régulièrement.

ORACLE Centre Val-de-Loire est organisé en 5 thèmes :

1 CHANGEMENT CLIMATIQUE

2 AGRO CLIMAT

3 IMPACTS AGRICOLES

4 ADAPTATIONS

5 ATTENUATIONS

ORACLE Centre Val-de-Loire est destiné à tous ceux qui se sentent concernés par l'avenir de l'agriculture régionale en lien avec le changement climatique : agriculteurs, conseillers agricoles, agents des services de l'état, élus et agents de collectivités territoriales, gestionnaires de ressources ou de territoires, membres d'associations, enseignants, élèves.

Contacts :

Christophe BEAUJOUAN – Chambre Régionale d'Agriculture de Centre Val-de-Loire
christophe.beaujouan@loir-et-cher.chambagri.fr

1 CHANGEMENT CLIMATIQUE



Observatoire Régional sur l'Agriculture et le Changement cLimatiqueE

Edition 2020 : liste des fiches

1 CHANGEMENT CLIMATIQUE

A1-Température moyenne annuelle.....	8
A2-Nombre de jours estivaux annuel.....	14
A3-Nombre de jours de gel annuel.....	19
A4-Cumul annuel des pluies.....	25
A5-Cumul saisonnier des pluies.....	31
A6-Cumul annuel d'évapotranspiration potentielle (ETP).....	35
A7-Cumul saisonnier d'évapotranspiration potentielle (ETP).....	38
A8-Déficit hydrique climatique (Pluies - ETP).....	42

2 AGRO CLIMAT

B1-Nombre de jours échaudants au printemps.....	47
B2-Nombre de jours de gel du 1er mars au 30 avril.....	51
B3-Début, durée et fin de la période de gel.....	55
B4-Indice de Winkler.....	61
B5-Indice de fraîcheur des nuits du 1er au 30 septembre.....	66
B6-Faisabilité d'une culture intermédiaire.....	71
B7-Date de reprise de végétation de la prairie et mise à l'herbe.....	77
B8-Episodes pluvieux intenses.....	83



3 IMPACTS AGRICOLES

C1-Rendement en blé tendre	87
C2-Rendement en maïs grain.....	93
C3-Dates de débourrement, floraison et maturité du raisin.....	100
C4-Teneur en sucre et en acidité totale des raisins.....	104
C5-Date de floraison du Douglas	109
C6 - Date de pleine floraison du pommier : Variété Golden.....	112
C7-Hydraulicité : débits des cours d'eau	115
C8-Niveau des nappes d'eau souterraine.....	118

4 ADAPTATIONS

A venir

5 ATTENUATIONS

E1-Occupation du sol et matière organique des sols.....	123
E2-Les émissions agricoles de gaz à effet de serre et le stockage carbone.....	127
E3-Livraisons des engrais minéraux azotés et volatilisation de l'azote.....	142
E4-Surface en protéagineux	150



Statistiques

Les indicateurs présentés ont été traités statistiquement à l'aide d'une régression linéaire sur le logiciel de statistiques R (test F-statistic et p-value).

L'objectif de ce test statistique est de modéliser par une droite la relation entre deux variables quantitatives. La qualité du modèle est indiquée par le coefficient R^2 . Il représente la proportion des points de mesures qui est expliquée par la régression linéaire. Cette valeur est comprise entre 0 (modèle n'explique rien) et 1 (le modèle est parfait et tous les points sont sur la droite de régression). Dans les analyses suivantes, les valeurs de R^2 sont faibles. Cela montre que les données mesurées présentent de grandes variations d'une année sur l'autre (variabilité interannuelle). Plus la variabilité interannuelle est forte, plus elle masque les tendances évolutives. Il faut dans ce cas allonger la durée des séries de mesures pour gommer cet effet. Par la suite, on a défini ces classes exprimant l'importance de la variabilité interannuelle :

- $R^2 < 0,1$: extrêmement importante
- $0,1 < R^2 < 0,2$: très importante
- $0,2 < R^2 < 0,3$: importante
- $R^2 > 0,3$: moyenne

Afin d'affirmer que les régressions linéaires correspondent à une tendance réelle et non pas à des variations dues au hasard, il faut être conscient du risque d'erreur que l'on prend à se tromper de conclusion. Une tendance avec un $P < 0,001$ est considérée comme très fiable, puisque cela signifie qu'il y a à 0,1 % de chance que la tendance soit due au hasard.

Ainsi, on a défini ces classes exprimant la force de la tendance :

- $P < 0,001$: très hautement significative
- $0,001 < P < 0,01$: hautement significative
- $0,01 < P < 0,05$: significative
- $P > 0,05$: non significative, noté parfois NS.

Dans le cas d'une tendance non significative, la courbe de tendance n'est pas transcrite sur le graphique.

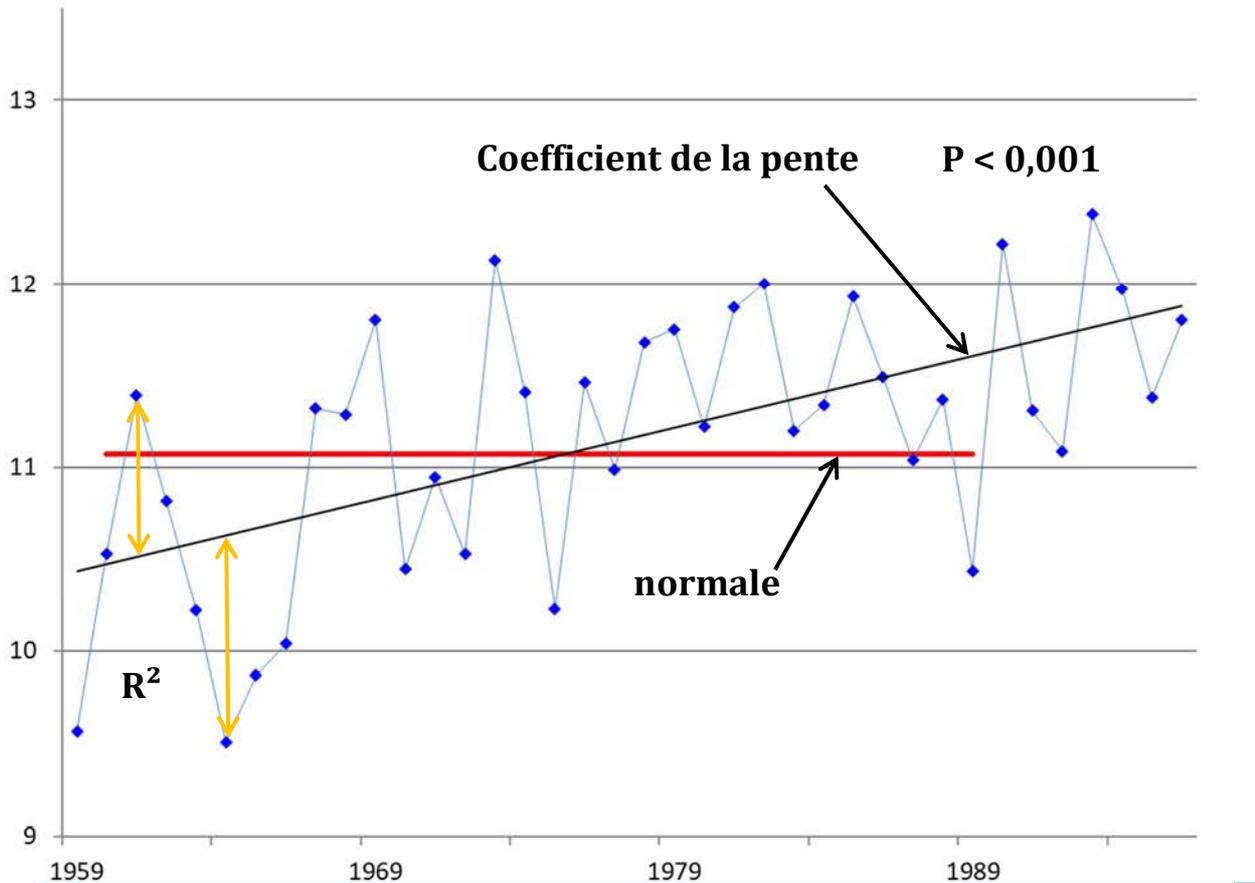
Pour caractériser le climat d'un lieu donné, les climatologues utilisent des normales climatiques : ils calculent les valeurs moyennes sur 30 ans des principaux paramètres météorologiques (valeur préconisée par l'Organisation Météorologique Mondiale). Le choix d'une durée de 30 ans pour caractériser un climat permet de disposer d'un nombre d'observations suffisamment grand pour que le résultat soit robuste. Cette durée est également bien adaptée pour s'affranchir de la variabilité interannuelle du climat (les variations d'une année sur l'autre) et pour mettre en évidence d'éventuelles évolutions du climat. La moyenne d'un paramètre météorologique sur une durée de 30 ans est appelée « normale ». A Météo-France, les normales sont recalculées tous les 10 ans, à chaque nouvelle décennie. Les dernières normales en vigueur sont actuellement les moyennes calculées sur la période 1981-2010. Ainsi, sur les stations utilisées dans ce livret, trois normales différentes ont été calculées : 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010. Les comparer permet de suivre l'évolution du climat sur la fin du 20ème siècle.

1 CHANGEMENT CLIMATIQUE



Observatoire Régional sur l'Agriculture et le Changement climatique

Par exemple, la température moyenne à Tours depuis 1980.



- R^2 : Le coefficient de détermination est une mesure de la qualité de la prédiction d'une régression linéaire et varie entre 0 et 1. Plus la somme des écarts entre les valeurs et la courbe de tendance (flèche orange) est grande plus la valeur de R^2 est petite et plus la variabilité interannuelle est grande.
- Le coefficient de la pente donne l'évolution de la régression linéaire. Ici : « $y = 0,039 x$ » signifie que la tendance est de + 0,039°C/an, soit + 0,39 °C tous les 10 ans. A noter que si la tendance n'est pas significative ($P < 0,05$), alors la courbe de tendance n'est pas transcrite.
- Le test de significativité P est indiqué pour exprimer la force de la tendance. Ici $P < 0,001$ ce qui signifie que la tendance est très hautement significative.
- La normale est une moyenne trentenaire. En comparant les 3 normales : 1961-1990, 1971-2000 et 1981-2010 (si elles sont disponibles), cela permet d'appréhender la vitesse d'évolution de la tendance.



A1-Température moyenne annuelle

🔑 Nature et source des données

Séries quotidiennes fournies par Météo France de 1959 à 2017

🕒 Indicateur 1

Séries de 1959 à 2017 sur 6 stations :

- 18 : Bourges
- 28 : Chartres
- 36 : Châteauroux Déols
- 37 : Tours
- 41 : Romorantin
- 45 : Chambon-la-Forêt

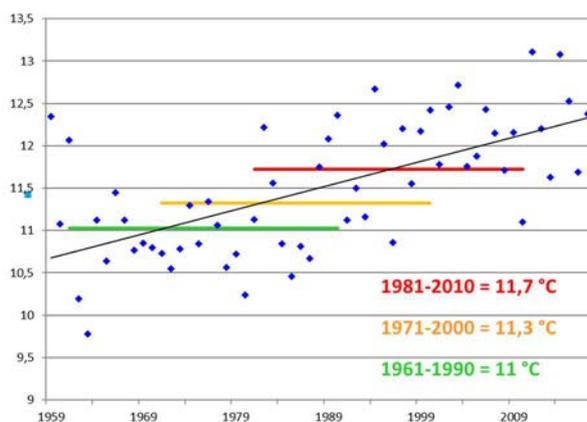
🧮 Calcul de l'indicateur 1

- Moyenne sur l'année des températures moyennes journalières (nuage de points bleus)
- Tendence linéaire sur la période 1959 – 2017 (courbe noire)
- Moyenne trentenaire des températures moyennes annuelles (courbe verte : 1961-1990 ; courbe orange : 1971-2000 ; courbe rouge : 1981-2010)

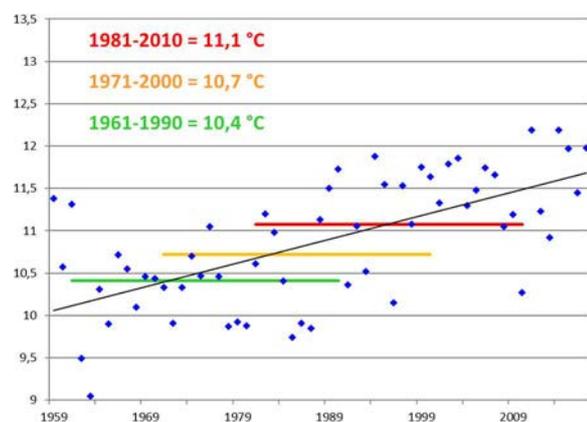
📈 Évolution observée

- En abscisse : Années
- En ordonnée : Température moyenne en °C

Bourges



Chartres



1

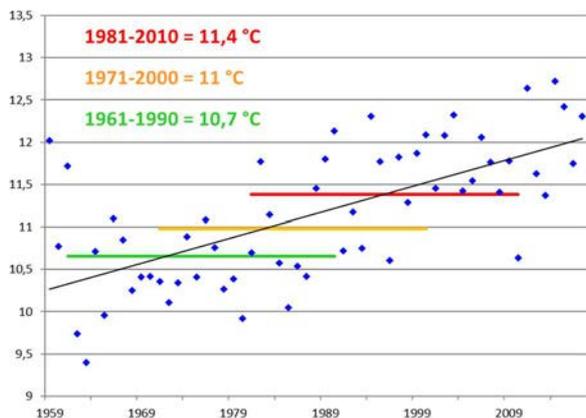
CHANGEMENT CLIMATIQUE



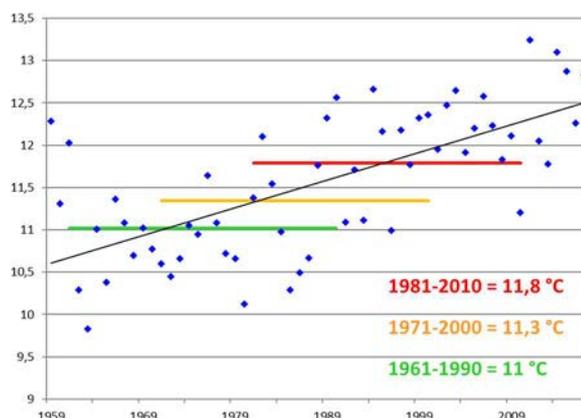
Observatoire Régional sur l'Agriculture et le Changement climatique

A1-Température moyenne annuelle

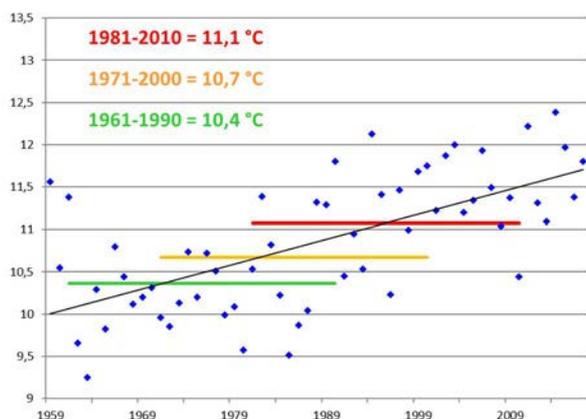
Châteauroux Déols



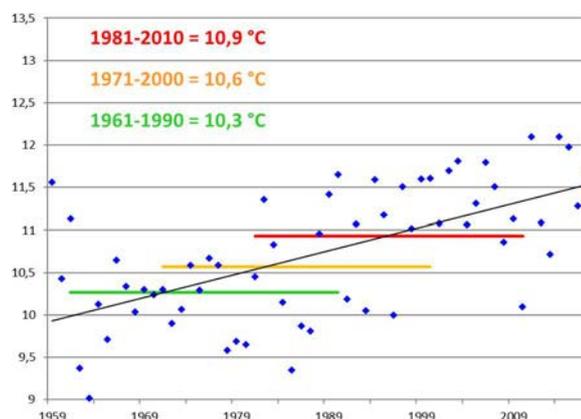
Tours



Romorantin



Chambon-la-Forêt



Analyse

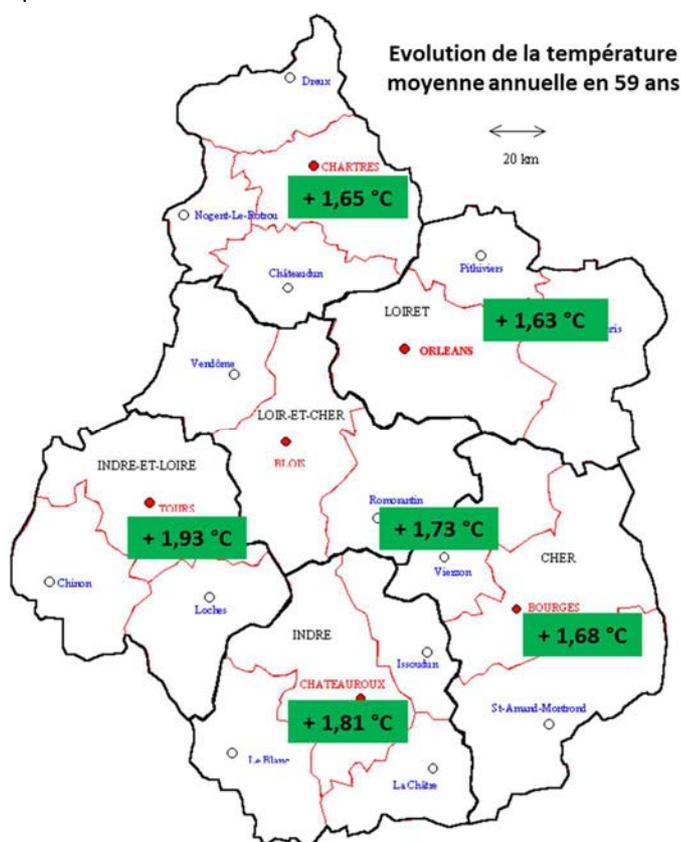
Dép.	Stations	1ères années disponibles	Nb d'années analysées	évolution °C /10 ans	évolution °C /59 ans	Test	"Force" de la tendance	R ²
18	Bourges	1959	59	0,28	+1,68 °C	8,31E-08	très hautement significative	0,40
28	Chartres	1959	59	0,28	+1,65 °C	4,87E-08	très hautement significative	0,41
36	Châteauroux Déols	1959	59	0,31	+1,81 °C	1,70E-08	très hautement significative	0,43
37	Tours	1959	59	0,33	+1,93 °C	5,25E-09	très hautement significative	0,45
41	Romorantin	1959	59	0,29	+1,73 °C	3,58E-08	très hautement significative	0,42
45	Chambon-la-Forêt	1959	59	0,28	+1,63 °C	3,33E-07	très hautement significative	0,37



A1-Température moyenne annuelle

L'évolution de la température moyenne observée en Région Centre Val-de-Loire depuis 59 ans pour chaque station montre que :

- les tendances (ajustement linéaire) observées sur l'ensemble de la période 1959-2017 sont de :
 - + 0,28°C par décennie à Bourges soit + 1,68°C en 59 ans
 - + 0,28°C par décennie à Chartres soit + 1,65°C en 59 ans
 - + 0,31°C par décennie à Châteauroux Déols soit + 1,81°C en 59 ans
 - + 0,33°C par décennie à Tours soit + 1,93°C en 59 ans
 - + 0,29°C par décennie à Romorantin soit + 1,73°C en 59 ans
 - + 0,28°C par décennie à Chambon-la-Forêt soit + 1,63°C en 59 ans



- l'augmentation des températures est significative dans les 6 stations de la région ($P < 10E-06$).
- Il semble que ce réchauffement climatique augmente lorsque l'on compare les 3 moyennes trentennaires. En moyenne, sur les 6 départements :
 - + 0,31 °C entre « 1985 » (1961-1990) et « 1975 » (1971-2000)
 - + 0,39 °C entre « 1995 » (1981-2010) et « 1985 » (1961-1990)
- les variations de température d'une année à l'autre (variabilité inter-annuelle) sont moyennes car R^2 moyen = 0,4.
- Ces évolutions se retrouvent dans la moyenne des régions voisines. Par exemple :
 - + 0,35°C par décennie à Angers en 44 ans (Colombie et al, 2017),
 - + 0,44°C par décennie au Mans en 44 ans (Colombie et al, 2017),
 - + 0,24°C par décennie pour Poitiers de 1950 à 2000 (Levrault et al, 2015).

1 CHANGEMENT CLIMATIQUE



Observatoire Régional sur l'Agriculture et le Changement cLimatiquE

A1-Température moyenne annuelle

🔑 Nature et source des données

Séries quotidiennes fournies par Météo France de 1959 à 2017

🕒 Indicateur 2

Séries de 1959 à 2017 sur la station de :

- 37 : Tours

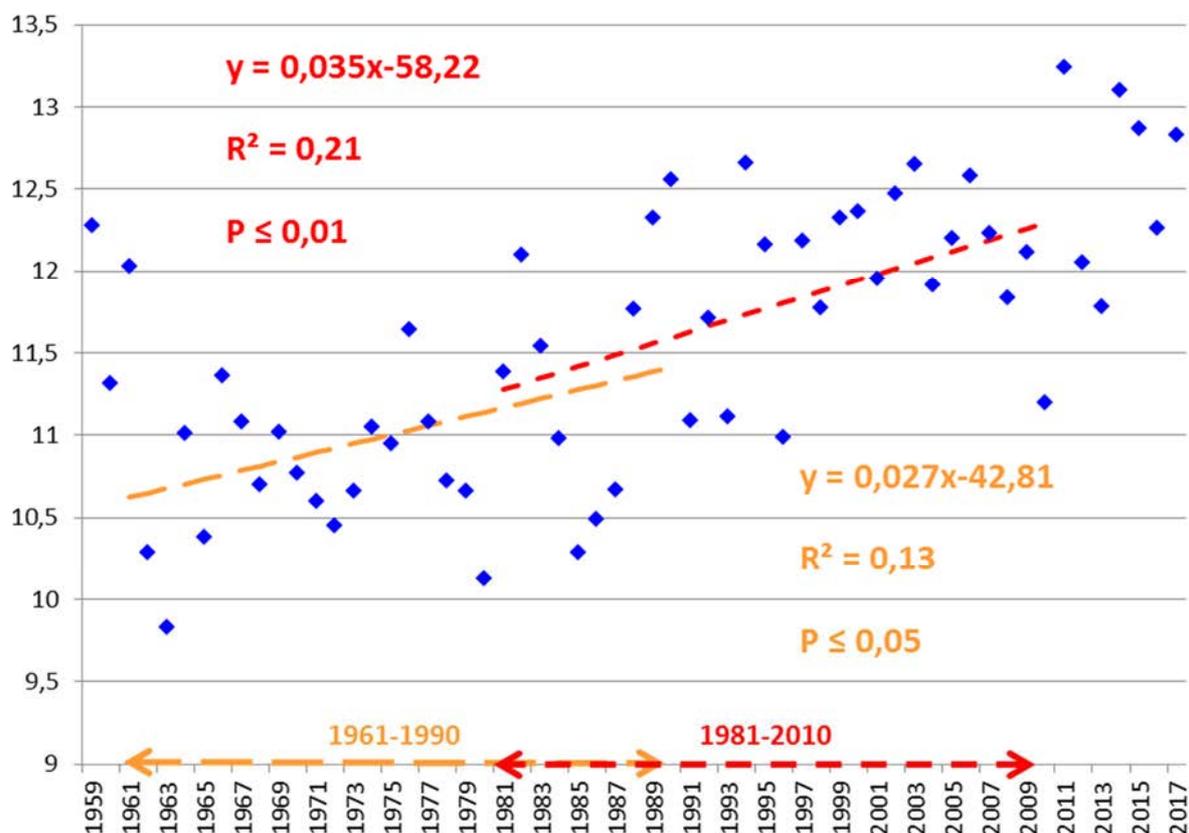
📊 Calcul de l'indicateur 2

- Moyenne sur l'année des températures moyennes journalières (nuage de points bleus)
- Tendence linéaire des 2 périodes ayant servi au calcul des normales : pente orange : 1961-1990 et pente rouge : 1981-2010

📈 Évolution observée

- En abscisse : Années
- En ordonnée : Température moyenne en °C

Tours





A1-Température moyenne annuelle

- L'accroissement sur un siècle (1901-2000) des températures moyennes en France est important (de 0,7 °C à plus de 1,1 °C), soit entre + **0,07 et 0,11 °C/10 ans**. Il est plus marqué sur le sud-ouest du territoire (Moisselin et al., 2002).



Cartographie des tendances 1901-2000 de la température moyenne (en °C/siècle)
(à partir de 70 séries)

- Les résultats de l'indicateur 1 montrent une augmentation de 1,7 °C (moyenne des 6 stations de la Région Centre Val-de-Loire) en 59 ans (1959-2017), soit **0,29 °C/10 ans**. Ce réchauffement semble donc s'accélérer à partir du milieu du XXème siècle : accroissement 3 fois plus important entre 1959 – 2017 (= tendance régionale) par rapport à 1901 – 2000 (= tendance nationale).
- L'indicateur n°3 nous indique également une accélération du réchauffement climatique sur la station de Tours. La tendance linéaire observée sur la période de 1961-1990 indique une augmentation de **0,27 °C/10 ans** alors que celle de 1981-2010 indique une augmentation de **0,35 °C/10 ans**.
- Au niveau mondial, la température annuelle des terres et des océans a augmenté à un taux moyen de 0,07 °C par décennie depuis 1880 ; cependant, le taux moyen d'augmentation est deux fois plus élevé depuis 1980. Ainsi, les 18 années les plus chaudes appartiennent au XXIème siècle (OMM).

Années les plus chaudes depuis 1880	Anomalie (en °C)
2016	0,95
2015	0,91
2017	0,85
2018	0,79
2014	0,75
2010	0,7
2013	0,67
2005	0,66
2009	0,64
1998	0,64

A1-Température moyenne annuelle

Classement des dix années les plus chaudes (température annuelle moyenne mondiale terres et océans) **enregistrées en 138 ans** (1880-2017)
Source NOAA

1 CHANGEMENT CLIMATIQUE



Observatoire Régional sur l'Agriculture et le Changement climatique

- Selon l'indicateur n°2, les fortes variations de température d'une année à l'autre (variabilité dite inter annuelle) sont fréquemment supérieures à 1,5 °C, perturbant ainsi la perception de la tendance. Par exemple à Romorantin, il existe une différence de la température moyenne annuelle de 1,78 °C entre 2010 (10,44 °C) et 2011 (12,22 °C)
- La température moyenne journalière est la moyenne de la température journalière minimale et maximale. Une étude plus poussée aurait permis de montrer que les températures minimales sont plus en hausse (de 0,7 à 1,7 °C/siècle) que les maximales (de 0 à 1,3 °C/siècle), ce qui a entraîné une diminution de l'amplitude thermique au cours du XXème siècle (Moisselin et al., 2002).
- L'accélération du réchauffement impacte fortement l'agriculture au travers notamment du raccourcissement des calendriers culturaux et de l'augmentation des stress thermiques des cultures. Le dernier rapport du GIEC, confirme la très forte probabilité que ce réchauffement se poursuive.

Pour aller plus loin

L'étude des températures saisonnières permettrait de connaître la répartition du réchauffement au sein des différentes saisons.

A retenir

Les différentes séries de données disponibles en Région Centre Val-de-Loire mettent en évidence une évolution des températures moyennes cohérente avec l'évolution observée en France et dans le monde. Depuis 1959, la température moyenne annuelle s'est élevée de **0,29 °C par décennie** (moyenne des 6 stations départementales), soit **+ 1,74 °C en 59 ans**.

Cette évolution semble s'accroître à la fin du XXème siècle : **+ 0,35 °C/décennie** sur la station de Tours entre 1981 et 2010.

Cet accroissement important des températures, de plus en plus rapide ces dernières décennies, impose au conseiller agricole de réactualiser les références climatiques utilisées (dates de semis, choix de variétés) pour mieux anticiper les conditions thermiques des prochaines années. Cependant, la variabilité inter-annuelle reste présente ($R^2=0,4$) ce qui impose une réactivité importante dans les choix qui sont faits et d'intégrer la notion de risque et de résilience des systèmes de cultures proposés.

Pour en savoir plus

MOISSELIN J.M, SCHNEIDER M., CANELLAS M., MESTRE O. (2002) : Les changements climatiques en France au XXème siècle : étude des longues séries homogénéisées de température et de précipitations, La Météorologie n° 38, 45-56.

Organisation Météorologique Mondiale - <https://public.wmo.int/fr/medias/communiqu%C3%A9s-de-presse/lorganisation-m%C3%A9t%C3%A9orologique-mondiale-confirme-que-2017-se-classe-parmi>

National Centers For Environmental Information (NOAA) - <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201713>



A2-Nombre de jours estivaux annuel

🔑 Nature et source des données

Séries quotidiennes fournies par Météo France de 1959 à 2017

🕒 Indicateur 1

Séries de 1959 à 2017 sur 5 stations :

- 18 : Bourges
- 28 : Chartres
- 36 : Châteauroux Déols
- 41 : Romorantin
- 45 : Orléans

Séries de 1982 à 2017 sur 1 station :

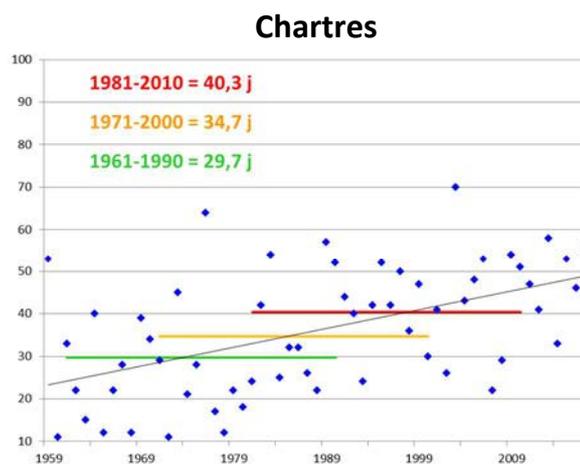
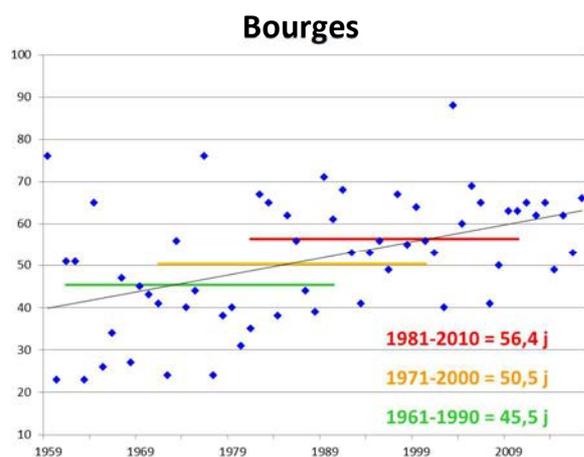
- 37 : Tours

📊 Calcul de l'indicateur 1

- Nombre de jours pour chaque année où la température maximale journalière est supérieure ou égale à 25°C (nuage de points bleus).
- Tendence linéaire sur la période 1959 – 2017 (courbe noire)
- Moyenne trentenaire du nombre de jours estivaux (courbe verte : 1961-1990 ; courbe orange : 1971-2000 ; courbe rouge : 1981-2010)

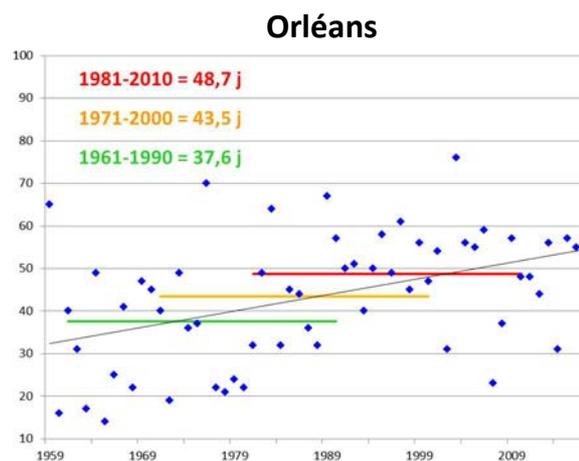
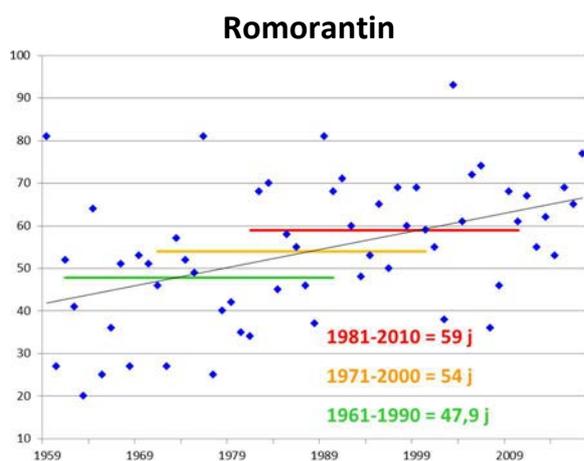
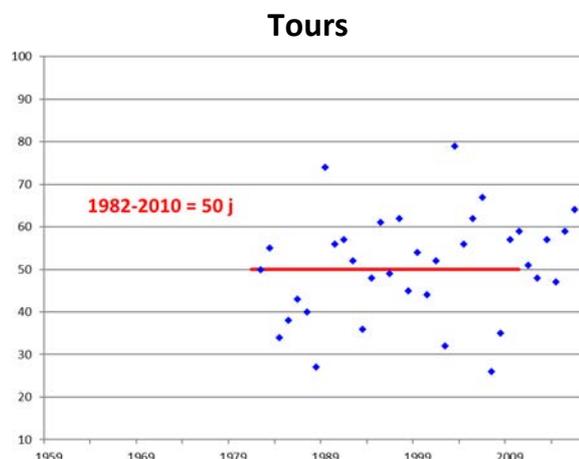
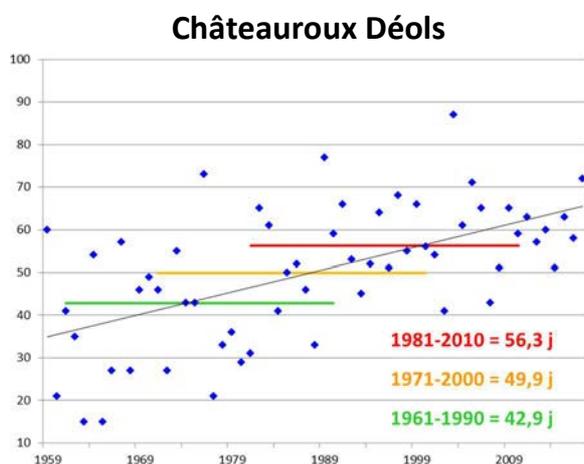
📈 Évolution observée

- En abscisse : Années
- En ordonnée : Nombre de journées estivales par an





A2-Nombre de jours estivaux annuel



Analyse

Dép.	Stations	1ère année disponible	Nb d'années analysées	pente	évolution /10 ans	évolution /59 ans	Test	"Force" de la tendance	R ²
18	Bourges	1959	59	0,403	4,026	+ 23,8 j	2,32E-04	très hautement significative	0,21
28	Chartres	1959	59	0,443	4,430	+ 26,1 j	3,34E-05	très hautement significative	0,26
36	Châteauroux Déols	1959	59	0,528	5,278	+ 31,1 j	2,03E-06	très hautement significative	0,33
37	Tours	1982	36	0,323	3,232	+ 19,1 j	1,06E-01	non significative	0,08
41	Romorantin	1959	59	0,425	4,246	+ 25,1 j	3,85E-04	très hautement significative	0,20
45	Orléans	1959	59	0,379	3,791	+ 22,4 j	5,81E-04	très hautement significative	0,19

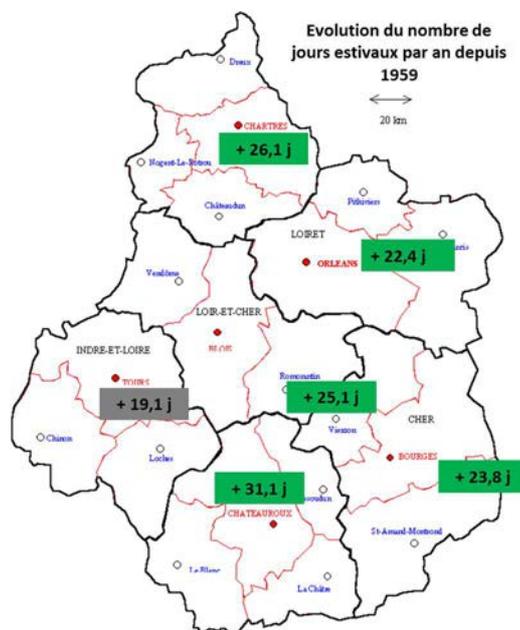


A2-Nombre de jours estivaux annuel

L'évolution du nombre de jours estivaux en Région Centre Val-de-Loire depuis 1959 (1982 pour la station de Tours) montre que :

- les tendances (ajustement linéaire) observées sur l'ensemble de la période sont de :

- + **4,0 j par décennie** à Bourges, soit + 24 j en 59 ans
- + **4,4 j par décennie** à Chartres, soit + 26 j en 59 ans
- + **5,3 j par décennie** à Châteauroux Déols, soit + 31 j en 59 ans
- + **3,2 j par décennie** à Tours (NS)
- + **4,2 j par décennie** à Romorantin, soit + 25 j en 59 ans
- + **3,8 j par décennie** à Orléans, soit + 22 j en 59 ans



- Toutes les stations montrent une tendance significativement à la hausse sauf Tours qui n'est pas significatif mais à cause sans doute d'une période trop courte de mesures. En 59 ans, le nombre de journées estivales a été multiplié par 1,7 (moyenne des 5 stations), entre 1959 et 2017, voire par 2 pour Chartres et Châteauroux.

- Ces évolutions se retrouvent dans la moyenne des régions voisines. Par exemple :

- + **4,5 j par décennie** à Poitiers (Levrault et al, 2015),
- + **5,0 j par décennie** au Mans (Colombie et al, 2017).

- Le nombre de jours estivaux par an est très variable d'une année à l'autre car R^2 moyen = 0,2.

- l'évolution du nombre de jours estivaux semble être constant lorsque l'on compare les 3 moyennes trentenaires (disponibles sur 5 départements seulement) :

- + 5,8 j entre « 1985 » (1961-1990) et « 1975 » (1971-2000)
- + 5,6 j entre « 1995 » (1981-2010) et « 1985 » (1961-1990)



A2-Nombre de jours estivaux annuel

Pour l'agriculture régionale, cette augmentation des jours estivaux renvoie à trois types de conséquences, sous réserve de vérifier comment a évolué la distribution intra-annuelle de ces jours estivaux :

- au printemps, les jours d'échaudage thermique deviennent de plus en plus nombreux, mais leur impact réel sur les cultures (céréales à paille en particulier) dépend également de l'avancement des calendriers culturaux (esquive) liée à l'augmentation de la température (Brisson et al., 2010) ;
- à l'automne l'augmentation du nombre de jours chauds affecte la viticulture ; lors des vendanges une température élevée des raisins peut favoriser une fermentation non désirée.
- le nombre de jours par an à forte évapotranspiration s'accroît en raison de la relation étroite entre température et évapotranspiration potentielle
- le nombre de jour estivaux par an va avoir un impact sur les essences forestières. C'est l'année 2003 qui possède le record de jours très chauds annuels pour toutes les stations avec 82 jours en moyenne (record de **93 jours pour Romorantin**). Tous les forestiers ont en mémoire cette année record car elle a eu des répercussions importantes sur les massifs forestiers.
- en élevage, 25°C correspond à un seuil au-delà de laquelle la réduction de l'ingestion est significative chez la truie avec une élévation des besoins en eau (pour maintenir l'homéothermie) (Renaudeau et al., 2004). Ce réflexe se déclenche aussi chez les ruminants. Si cet état se prolonge, la quantité de lait produit est impactée (Morand-Fehr et al., 2001).



A Retenir

Le nombre de jours estivaux par an a nettement augmenté en Centre Val-de-Loire au cours de ces 59 dernières années avec **+ 4,3 jours par décennie en moyenne**.

Les incidences de ces jours estivaux sur l'agriculture régionale sont multiples, mais nécessitent un examen détaillé de la répartition saisonnière des augmentations observées.



Pour aller plus loin

Ces résultats ne permettent pas de localiser cette augmentation de jours estivaux dans une année. Pour cela, il faudrait examiner, soit par saison, soit mois par mois, l'évolution du nombre de jours estivaux, afin de préciser comment la distribution intra-annuelle des épisodes de fortes chaleurs évolue (voir Nombre de jours échaudants au printemps).



A2-Nombre de jours estivaux annuel



Pour en savoir plus

BRISSEON N, LEVRAULT F, 2010. Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces. Le livre vert du projet CLIMATOR (2007-2010). ADEME.

MORAND-FEHR P., DOREAU M. ; 2001. Ingestion et digestion chez les ruminants soumis à un stress de chaleur. INRA Prod. Anim., 14, 15-27.

RENAUDEAU D., MANDONNET N., TIXIER-BOICHARD M., NOBLET j., BIDANEL J-P. ; 2004. Atténuer les effets de la chaleur sur les performances des porcs : voie génétique. INRA Prod. Anim., 17, 93-108.

COLOMBIE et al, ORACLE Pays de la Loire, 2017, <https://pays-de-la-loire.chambres-agriculture.fr>

LEVRAULT et al, ORACLE Poitou Charentes, 2015, <https://deux-sevres.chambre-agriculture.fr>



A3-Nombre de jours de gel annuel

🔑 Nature et source des données

Séries quotidiennes fournies par Météo France de 1959 à 2017

🕒 Indicateur 1

Séries de :

- 18 : Bourges, 1959 à 2017
- 28 : Chartres, 1959 à 2017
- 36 : Pellevoisin, 1963 à 2017
- 37 : Tours, 1982 à 2017
- 41 : Romorantin, 1988 à 2017
- 45 : Chambon-la-Forêt, 1983 à 2017

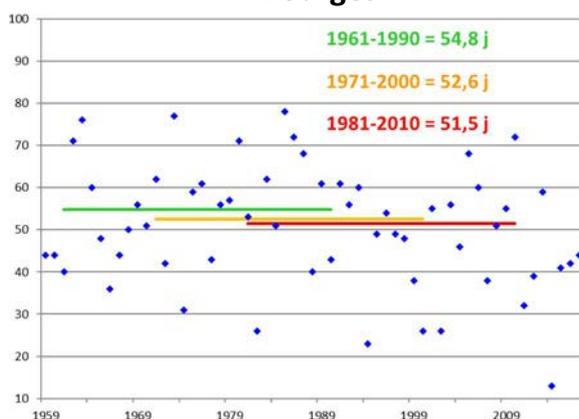
📊 Calcul de l'indicateur 1

- Nombre de jours pour chaque année où la température minimale journalière est inférieure ou égale à 0°C (nuage de points bleus).
- Tendence linéaire sur la période disponible (courbe noire)
- Moyenne trentenaire du nombre de jours de gel par an (courbe verte : 1961-1990 ; courbe orange : 1971-2000 ; courbe rouge : 1981-2010)

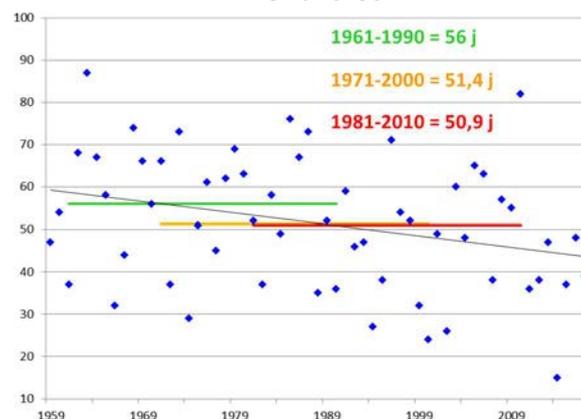
📈 Évolution observée

- En abscisse : Années
- En ordonnée : Nombre de jours de gel par an

Bourges



Chartres



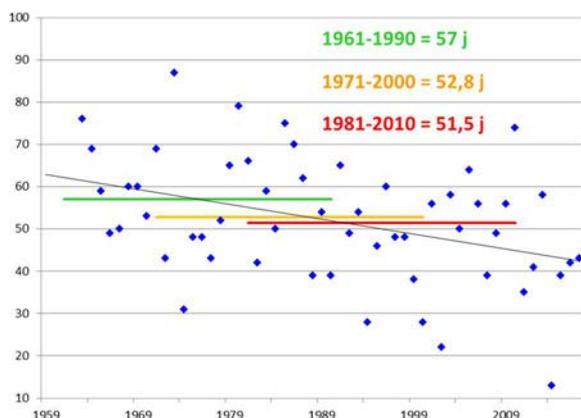
1 CHANGEMENT CLIMATIQUE



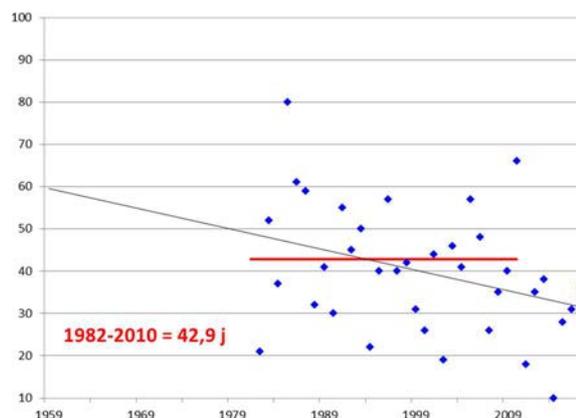
Observatoire Régional sur l'Agriculture et le Changement climatique

A3-Nombre de jours de gel annuel

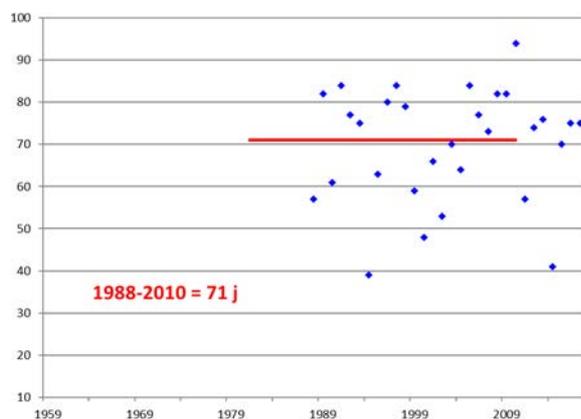
Pellevoisin



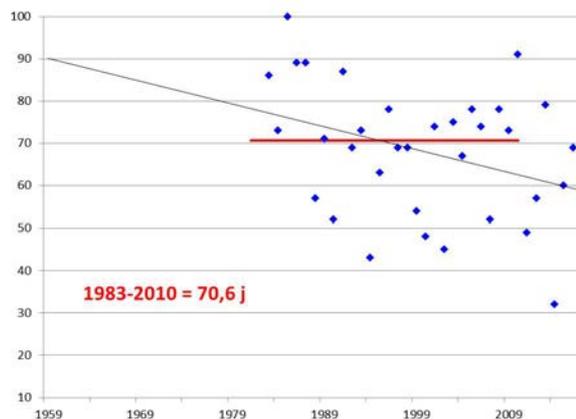
Tours



Romorantin



Chambon-la-Forêt



Analyse

Analyse de la tendance linéaire sur la période disponible

Dép.	Stations	1ères années disponibles	Nb d'années analysées	évolution /10 ans	évolution /30 ans	Test	"Force" de la tendance	R ²
18	Bourges	1959	59	-1,8	-5,5 j	0,0912	non significative	0,05
28	Chartres	1959	59	-2,7	-8,1 j	0,0225	significative	0,09
36	Pellevoisin	1963	55	-3,5	-10,6 j	0,0036	hautement significative	0,15
37	Tours	1982	36	-4,8	-14,5 j	0,0414	significative	0,12
41	Romorantin	1988	30	1,3	3,8 j	0,6639	non significative	0,01
45	Chambon-la-Forêt	1983	35	-5,4	-16,2 j	0,0344	significative	0,13



A3-Nombre de jours de gel annuel

L'évolution du nombre de jours de gel annuel en Région Centre Val-de-Loire montre que :

- les tendances (ajustement linéaire) observées sur l'ensemble de la période sont de :

- 1,8 j par décennie à Bourges (NS)

- **2,7 j par décennie** à Chartres, soit -8,1 j en 30 ans

- **3,5 j par décennie** à Pellevoisin, soit -10,6 j en 30 ans

- **4,8 j par décennie** à Tours, soit -14,5 j en 30 ans

+ 1,3 j par décennie à Romorantin (NS)

- **5,4 j par décennie** à Chambon-la-Forêt, soit -16,2 j en 30 ans

- Seules les stations de Bourges et Romorantin ne montrent pas de tendance significative sur le nombre de jours de gelée annuelle. Les 4 autres stations montrent une tendance significativement en baisse, de **- 4 jours par décennie** en moyenne.

- La tendance du nombre de jours de gel est beaucoup moins significative (3 % de chance en moyenne que la tendance soit due au hasard) que le nombre de jours estivaux (0,02 % de chance en moyenne que la tendance soit due au hasard).

- Ces évolutions se retrouvent dans la moyenne des régions voisines. Par exemple :

- **2,5 j par décennie** à Poitiers (Levrault et al, 2015),

- **5,0 j par décennie** au Mans (Colombie et al, 2017).

- Le nombre de jours de gel par an est très variable d'une année à l'autre (variabilité inter-annuelle) car R^2 moyen = 0,1 (sur les stations avec tendance significative).

1 CHANGEMENT CLIMATIQUE

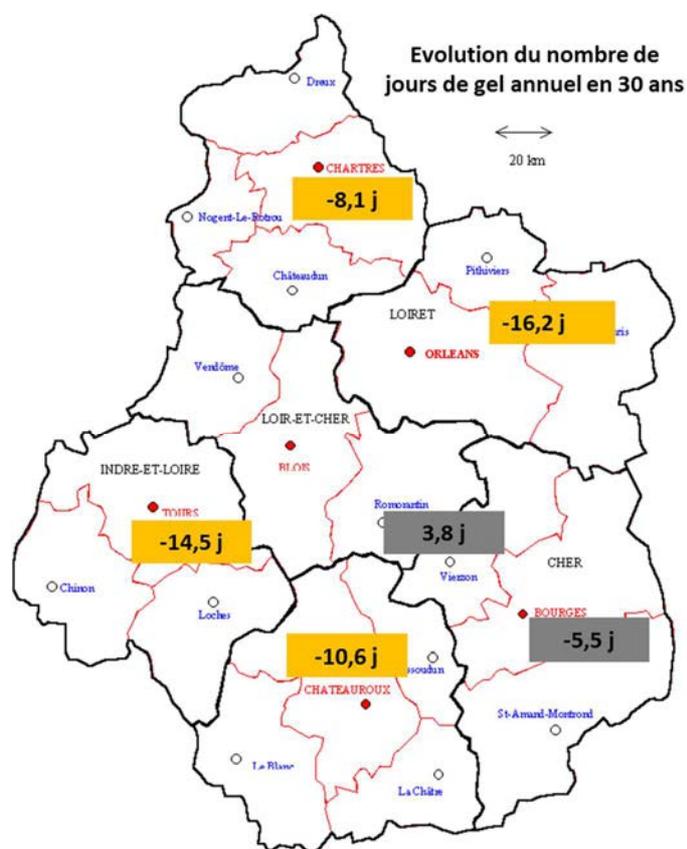


Observatoire Régional sur l'Agriculture et le Changement cLimatiqueE

- l'évolution du nombre de jour de gel semble ralentir lorsque l'on compare les 3 moyennes trentenaires (disponibles sur 3 départements seulement) :

- 3,7 j entre « 1985 » (1961-1990)
et « 1975 » (1971-2000)

- 1,0 j entre « 1995 » (1981-2010)
et « 1985 » (1961-1990)





A3-Nombre de jours de gel annuel

A priori, on n'observe pas de différence d'évolution entre les départements (différence est-ouest ou nord-sud).

Pour l'agriculture régionale, la diminution du nombre annuel de jours de gel a des répercussions sur de multiples processus de la production végétale, par exemple :

- l'impact de la durée et la levée de dormance sur la qualité de la floraison chez les espèces fruitières (Mathieu, 2013) mais également maraîchère (exemple de l'asperge).
- l'impact du gel sur la résistance des organes fructifère. Par exemple, pour le colza, le stade le plus sensible au froid est du stade « ouverture du bouton » à 20 jours après la pollinisation (Lardon, 1995). Autre exemple concernant la qualité de la pré-floraison chez le tournesol.

On sait également que cette baisse de fréquence des épisodes froids a des incidences sur les cycles de reproduction et de croissance de certains parasites, bien que ces effets soient plus difficiles à documenter que les effets directs du froid sur la croissance et le développement des végétaux.

Les conséquences de cette diminution du nombre de jours froids sur les productions agricoles régionales doivent être examinées au cas par cas car les décalages phénologiques des cultures liées à l'élévation tendancielle de la température pourrait faire persister le risque de gel sur les cultures.



A Retenir

Le nombre de jours de gel a décliné en Centre Val-de-Loire au cours des 40 dernières années d'environ - **4,1 jours par décennie en moyenne**. Cette tendance est moins significative que l'évolution du nombre de jours estivaux.

Cette réduction du nombre de jours froids n'est pas forcément synonyme de réduction de risque de gel printanier pour les cultures sensibles car l'avancement phénologique des plantes découlant du réchauffement climatique peut faire évoluer les dates des périodes à risque. Les impacts de cette réduction du nombre de jours froids sur les productions agricoles doivent donc être étudiés au cas par cas.



Pour aller plus loin

Ces graphiques ne permettent pas de préciser si la réduction du nombre de jours de gel porte sur une période particulière de la saison froide : fin d'automne, hiver ou début de printemps ; pour cela il faudrait dénombrer les jours de gel saison par saison, voire mois par mois.

Au vu du nombre de jours de gel en diminution, tous les végétaux qui pouvaient subir des gels létaux auparavant vont bénéficier de ce changement climatique mais ces conséquences doivent être étudiées au cas par cas : sensibilité au gel fort ($< -5^{\circ}\text{C}$) par rapport au gel faible ($-5^{\circ}\text{C} < x < 0^{\circ}\text{C}$), apparition du gel soudaine ou progressive, évolution des cycles végétatifs par rapport à la date de première gelée...



A3-Nombre de jours de gel annuel



Pour en savoir plus

COLOMBIE et al, ORACLE Pays de la Loire, 2017, <https://pays-de-la-loire.chambres-agriculture.fr>

LEVRAULT et al, ORACLE Poitou Charentes, 2015, <https://deux-sevres.chambre-agriculture.fr>

LARDON A, Thèse intitulée Effet du gel sur la floraison de colza d'hiver, 1995, Sensibilité des organes reproducteurs, impacts sur le rendement grainier et recherche de marqueurs biochimiques de résistance – résumé disponible sur http://www.terresinovia.fr/fileadmin/cetiom/Cultures/Colza/accidents/Note_impact_gel_colza_2.pdf
Consulté le 18 juillet 2018.

1 CHANGEMENT CLIMATIQUE



Observatoire Régional sur l'Agriculture et le Changement cLimatiqueE

A4-Cumul annuel des pluies

🔑 Nature et source des données

Séries quotidiennes fournies par Météo France de 1959 à 2017

🕒 Indicateur 1

Séries de 1959 à 2017 sur 6 stations :

- 18 : Bourges
- 28 : Chartres
- 36 : Châteauroux Déols
- 37 : Tours
- 41 : Vendôme
- 45 : Orléans

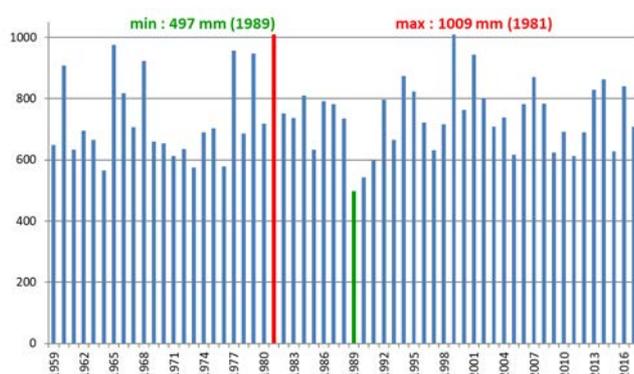
📊 Calcul de l'indicateur 1

- Cumul annuel des pluies journalières (diagramme bleu)
- Tendence linéaire sur la période disponible (courbe noire)
- Cumul annuel minimum (en vert) – Cumul annuel maximum (en rouge)

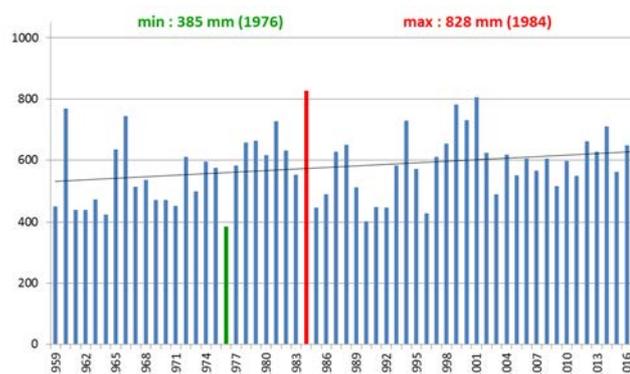
📈 Évolution observée

- En abscisse : Années
- En ordonnée : Pluies en mm

Bourges



Chartres



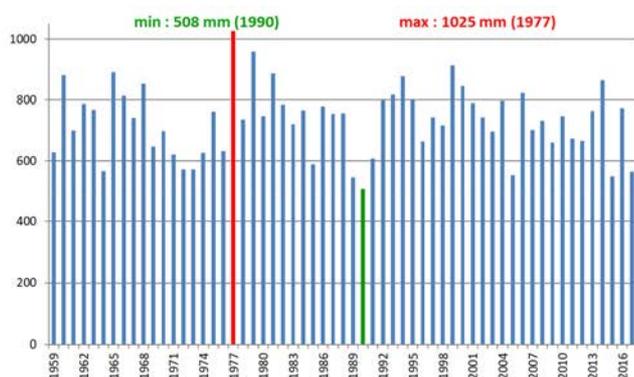
1 CHANGEMENT CLIMATIQUE



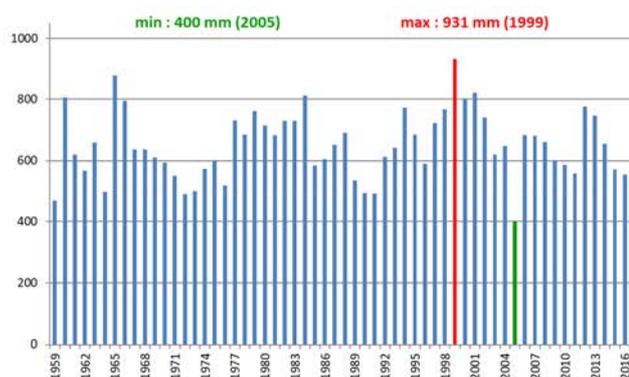
Observatoire Régional sur l'Agriculture et le Changement climatique

A4-Cumul annuel des pluies

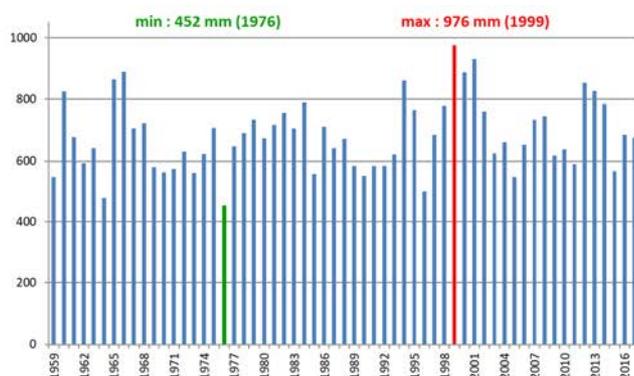
Châteauroux Déols



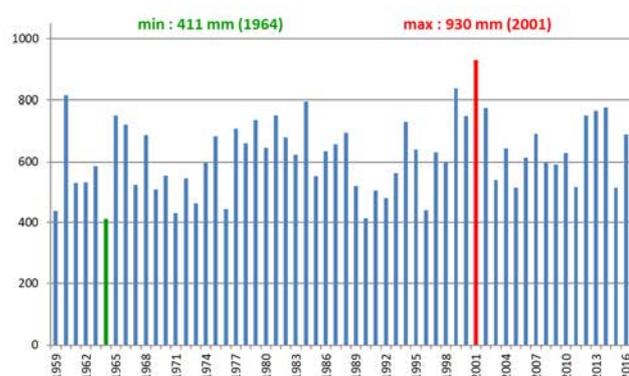
Tours



Vendôme



Orléans



Analyse

Analyse de la tendance linéaire sur la période disponible

Dép.	Stations	1ère année disponible	Nb d'années analysées	pente	évolution /10 ans	Test	"Force" de la tendance	R ²
18	Bourges	1959	59	0,506	5,064	0,593	non significative	0,01
28	Chartres	1959	59	1,703	17,035	0,038	significative	0,07
36	Châteauroux Déols	1959	59	-0,425	-4,254	0,623	non significative	0,00
37	Tours	1959	59	0,383	3,833	0,652	non significative	0,00
41	Vendôme	1959	59	1,164	11,639	0,186	non significative	0,03
45	Orléans	1959	59	1,466	14,659	0,105	non significative	0,05



A4-Cumul annuel des pluies

L'évolution du cumul annuel des pluies en Région Centre Val-de-Loire montre que :

- les tendances par ajustement linéaire observées sur l'ensemble de la période sont de :

+ 5,1 mm par décennie à Bourges (NS)

+ 17,0 mm par décennie à Chartres, soit +100,5 mm en 59 ans

- 4,2 mm par décennie à Châteauroux Déols (NS)

+ 3,8 mm par décennie à Tours (NS)

+ 11,6 mm par décennie à Vendôme (NS)

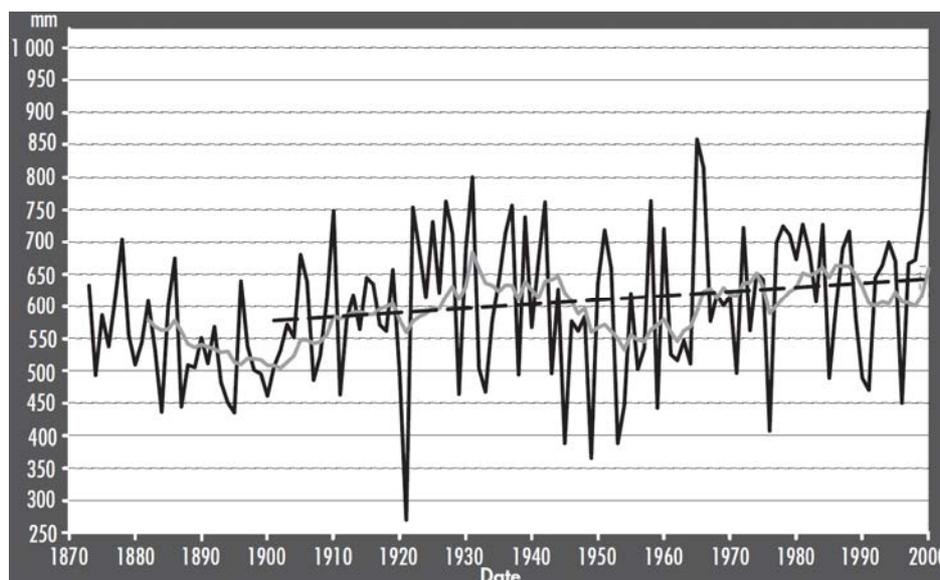
+ 14,7 mm par décennie à Orléans (NS)

- La plupart des tendances observées pour le cumul annuel des pluies ne sont pas significatives ce qui signifie que ces départements ont un cumul annuel **relativement constant depuis 59 ans**. Seule la station de Chartres montre une augmentation significative des pluies en cumul annuel (+100 mm depuis 1959).

- On observe de fortes variations de précipitations d'une année à l'autre pouvant atteindre jusqu'à 400 mm d'écart entre deux années consécutives (exemple de la station de Bourges entre l'année 1964 et 1965 avec respectivement 565 et 976 mm en cumul annuel). Cette variation annuelle (caractérisé par un $R^2 < 0,1$), nettement supérieure à la variation tendancielle sur la période d'étude, perturbe la perception d'une tendance éventuelle.

- ORACLE Pays de la Loire montre également que les stations aux mêmes latitudes que la région Centre Val-de-Loire ne dégagent pas de tendance claire. Par exemple : Le Mans et la Roche-sur-Yon n'ont pas d'évolution significative alors qu'Angers a eu une augmentation de 26 mm par décennie (Colombie et al.)

- La station de Paris-Montsouris permet de remonter jusqu'en 1873 (voir graphique ci-dessous). Cela conforte également les données de la Région Centre Val-de-Loire car la hausse des cumuls des précipitations est visuelle (coefficient de Spearman = 0,17) mais n'est pas significative statistiquement (Moisselin et al.).



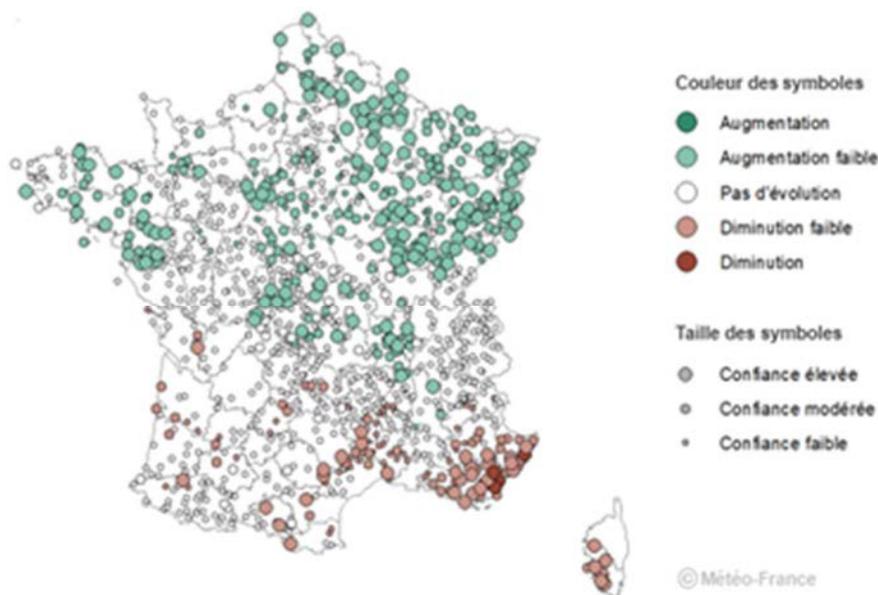
Evolution de 1873 à 2000 du cumul annuel des précipitations (en mm) à Paris-Montsouris, en noir. Moyenne glissante sur 15 ans en gris, tendance 1901-2000 en traits discontinus (Moisselin et al.)



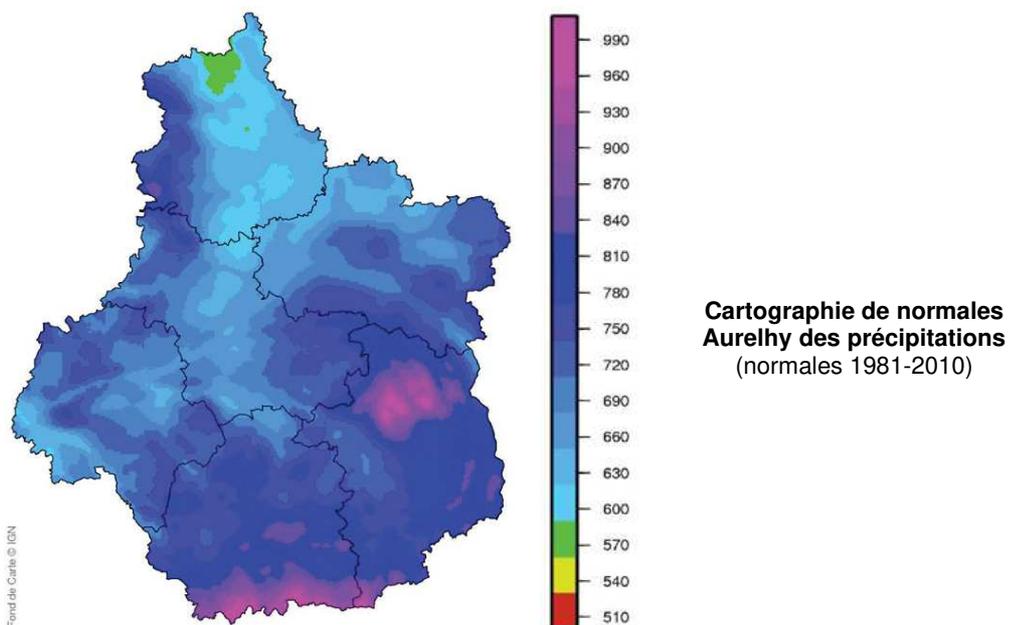
A4-Cumul annuel des pluies

- Une étude à l'échelle française montre que les 2/3 nord du pays présentent une hausse des cumuls mais non significatif alors que la partie sud de la France présente des baisses, mais non significatives (Moisselin et al., 2002).

Evolution observée du cumul annuel de précipitations sur la période 1959-2009
(source Météo France)



- Les précipitations régionales ne montrant pas d'évolutions importantes depuis 59 ans ; la carte des normales des précipitations 1981-2010 (voir cartographie ci-dessus) qui semble indiquer des précipitations supérieures au sud-est, conservera sûrement ces différences dans un futur proche.



1 CHANGEMENT CLIMATIQUE



Observatoire Régional sur l'Agriculture et le Changement climatique

- Ces résultats sont cohérents avec ceux du GIEC, à savoir une augmentation de 0,5 à 1 % par décennie du cumul annuel sur le XXème siècle aux moyennes et hautes latitudes continentales de l'hémisphère nord (Houghton et al, 2001).



A4-Cumul annuel des pluies

A Retenir

Au cours des 59 dernières années, on n'observe pas de tendance marquée du cumul annuel des pluies en région Centre Val-de-Loire, ce qui signifie une situation assez stable au cours du XX^{ème} siècle. Seule la station de Chartres (au nord de la Région Centre-Val-de-Loire) présente une augmentation significative des pluies de l'ordre de + 17 mm par décennie.

Pour aller plus loin

Le fait de considérer des moyennes annuelles peut masquer des tendances différentes pour chacune des saisons, d'où l'importance d'étudier également l'évolution des précipitations saisonnières voire mensuelles.

Pour en savoir plus

COLOMBIE et al, ORACLE Pays de la Loire, 2017, <https://pays-de-la-loire.chambres-agriculture.fr>

Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, N. Noguer, P. J. van der Linden, D. Xiaosu, K. Maskell and C. A. Johnson. Climate change 2001: The scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge. 2001. 881 pp. ISBN 0521 01495 6.

MOISSELIN J.M, SCHNEIDER M., CANELLAS M., MESTRE O. (2002) : Les changements climatiques en France au XX^{ème} siècle : étude des longues séries homogénéisées de température et de précipitations, La Météorologie n° 38, 45-56.



A5-Cumul saisonnier des pluies

🔑 Nature et source des données

Séries quotidiennes fournies par Météo France de 1959 à 2017

🕒 Indicateur 1

Séries de 1959 à 2017 sur 6 stations :

- 18 : Bourges
- 28 : Chartres
- 36 : Châteauroux Déols
- 37 : Tours
- 41 : Vendôme
- 45 : Orléans

📊 Calcul de l'indicateur 1

Cumul sur 3 mois des pluies journalières (diagramme bleu)

- Hiver : Décembre à Janvier
- Printemps : Mars à Mai
- Été : Juin à Août
- Automne : Septembre à Novembre

Tendance linéaire sur la période disponible (courbe noire)

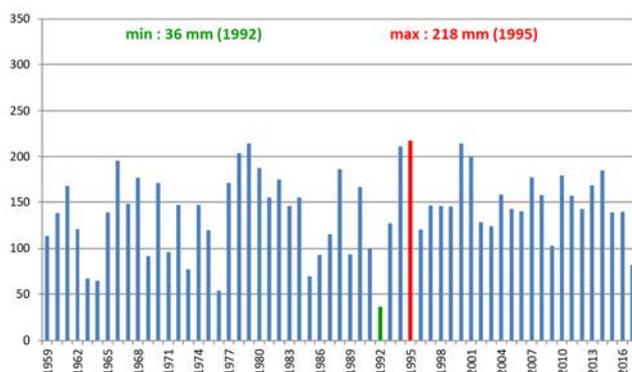
Cumul saisonnier minimum (en vert) – Cumul saisonnier maximum (en rouge)

📈 Évolution observée à Chartres

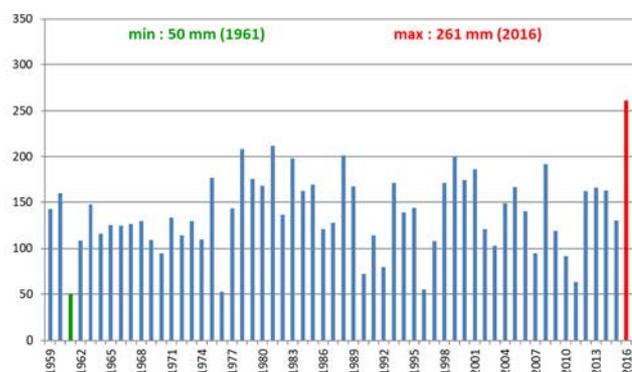
Seule la station de **Chartres** a été présentée sous forme de graphique, les autres stations sont synthétisées dans le tableau ci-dessous.

- En abscisse : Années
- En ordonnée : Pluies en mm

Hiver



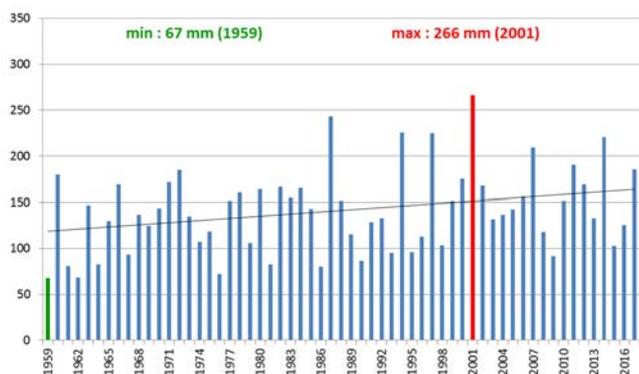
Printemps



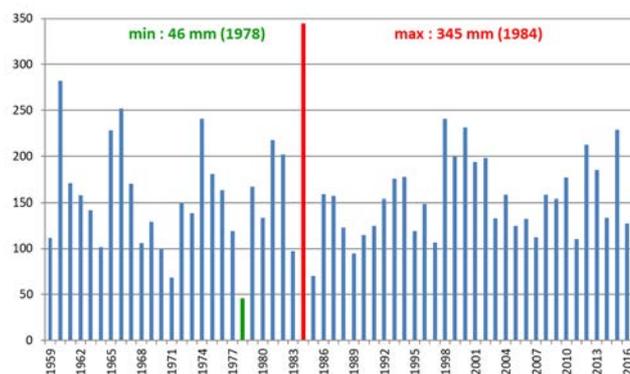


A5-Cumul saisonnier des pluies

Été



Automne



Analyse

Analyse de la tendance linéaire sur la période disponible des 6 stations départementales

	Bourges	Chartres	Châteauroux Déols	Tours	Vendôme	Orléans
Hiver	-0,8 (NS)	4,1 (NS)	-5,1 (NS)	1,1 (NS)	5,1 (NS)	0,4 (NS)
Printemps	3,4 (NS)	4,6 (NS)	-1,2 (NS)	1,3 (NS)	2,8 (NS)	3 (NS)
Été	2,4 (NS)	7,7 (P=0,02)	4,8 (NS)	2,2 (NS)	6,3 (NS)	10,9 (P=0,01)
Automne	-0,6 (NS)	0,4 (NS)	-3,5 (NS)	-1,1 (NS)	-1,3 (NS)	0,2 (NS)

Evolution saisonnière des pluies en mm par décennie (NS = Non significatif)

Les observations saisonnières affinent l'interprétation de la tendance annuelle non significative des cumuls de précipitations. On note qu'aucune tendance n'est significative, à part la saison estivale de Chartres et d'Orléans qui montrent une augmentation des pluies de respectivement 8 et 11 mm par décennie. Sans être significatif, on a :

- 6 stations sur 6 en hausse en **été** (dont 2 significatives)
- 5 stations sur 6 en hausse au **printemps**
- 4 stations sur 6 en hausse en **hiver**
- 4 stations sur 6 en baisse en **automne**

Ces observations diffèrent sensiblement de l'étude réalisée à l'échelle de la France (étude sur 40 séries départementales) où il avait été observé deux saisons caractéristiques (Moisselin et al.) :

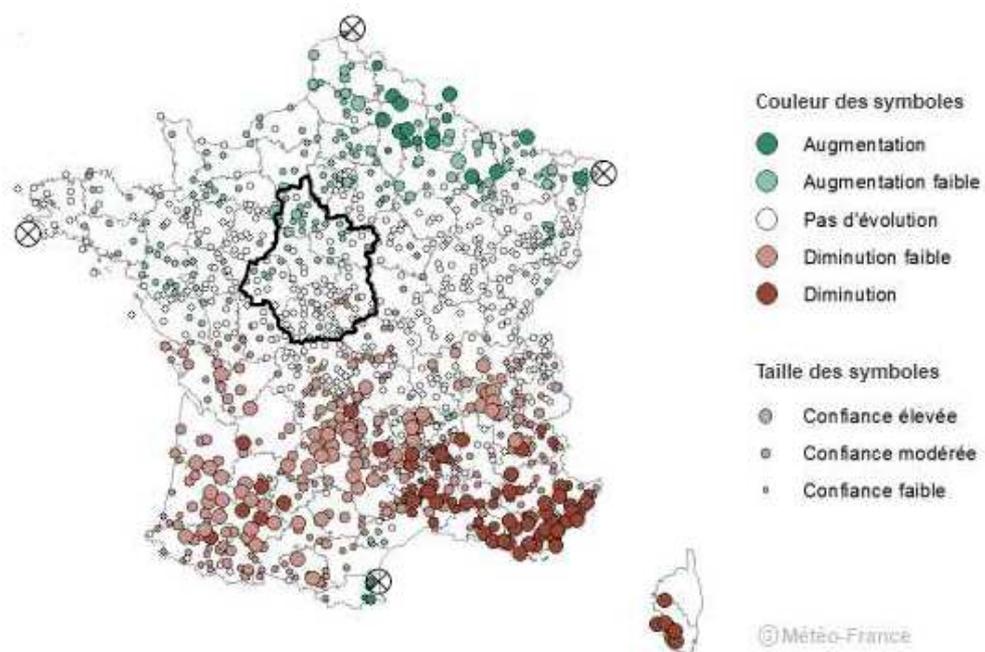
- en hiver, uniquement des séries de précipitations à la hausse (un tiers de ces hausses étant significatives).
- en été, une majorité de baisses, dont aucune cependant n'est significative.
- l'automne et le printemps présentent des résultats intermédiaires, la répartition obtenue pour l'automne le rapprochant plutôt de l'hiver (majorité de hausses), celle obtenue pour le printemps le rapprochant plutôt de l'été (un tiers de baisses).



A5-Cumul saisonnier des pluies

- ORACLE Pays de la Loire montre qu'aucune saison n'a de tendance significative à l'augmentation des précipitations (entre 1971 et 2015). La seule augmentation se situe en automne à Angers avec +12 mm par décennie.
- Concernant les précipitations hivernales, Météo-France a détecté une augmentation des précipitations hivernales au nord de la France et une diminution au sud de la France. La Région Centre se situe en zone intermédiaire où aucune évolution franche n'a été détectée. On retrouve ces résultats en hiver sur la Région Centre, mais non significatifs :
 - Augmentation du cumul de pluie hivernale au nord (Chartres, Orléans et Vendôme),
 - Diminution du cumul de pluie hivernale au sud (Châteauroux et Bourges)

Evolution observée entre 1960 et 2010 du cumul hivernal des précipitations en France (Météo-France)





A5-Cumul saisonnier des pluies

A Retenir

Au cours des 60 dernières années, on n'observe pas de tendance marquée, à la hausse ou à la baisse, du cumul saisonnier des pluies en région Centre Val-de-Loire. Seules 2 stations du nord de la Région Centre-Val-de-Loire, Orléans et Chartres, présentent une augmentation significative des pluies de l'ordre de + 9 mm par décennie en été. Cette observation va à l'encontre des études publiées qui mentionnent plutôt une majorité de baisse des pluies estivales.

L'hiver semble être de plus en plus arrosé (non significatif) plutôt au nord de la Région Centre ce qui corrobore les études publiées.

Pour aller plus loin

Il s'agit ici de cumul trimestriel (= saison) de pluie qui cache peut-être des variations plus localisées ; il serait intéressant d'étudier l'évolution des précipitations mensuelles. De plus, ces évolutions ne décrivent en rien les « modalités » précises de ces précipitations ; il serait intéressant d'étudier également le nombre d'épisodes pluvieux, les pluies intenses, le nombre de jours consécutifs sans pluie...

Pour en savoir plus

COLOMBIE et al, ORACLE Pays de la Loire, 2017, <https://pays-de-la-loire.chambres-agriculture.fr>

MOISSELIN J.M, SCHNEIDER M., CANELLAS M., MESTRE O. (2002) : Les changements climatiques en France au XXème siècle : étude des longues séries homogénéisées de température et de précipitations, La Météorologie n° 38, 45-56.



A6-Cumul annuel d'évapotranspiration potentielle (ETP)

🔑 Nature et source des données

On utilise des données issues de la chaîne d'analyse spatiale du bilan hydrique « SAFRAN-ISBA MODCOU » (SIM). La chaîne modélise l'indicateur d'ETP sur une grille de 8 x 8 km, dont les valeurs sont calculées en chaque point de la grille et moyennées sur la Région Centre Val-de-Loire.

Données fournies par Météo France

🕒 Indicateur 1

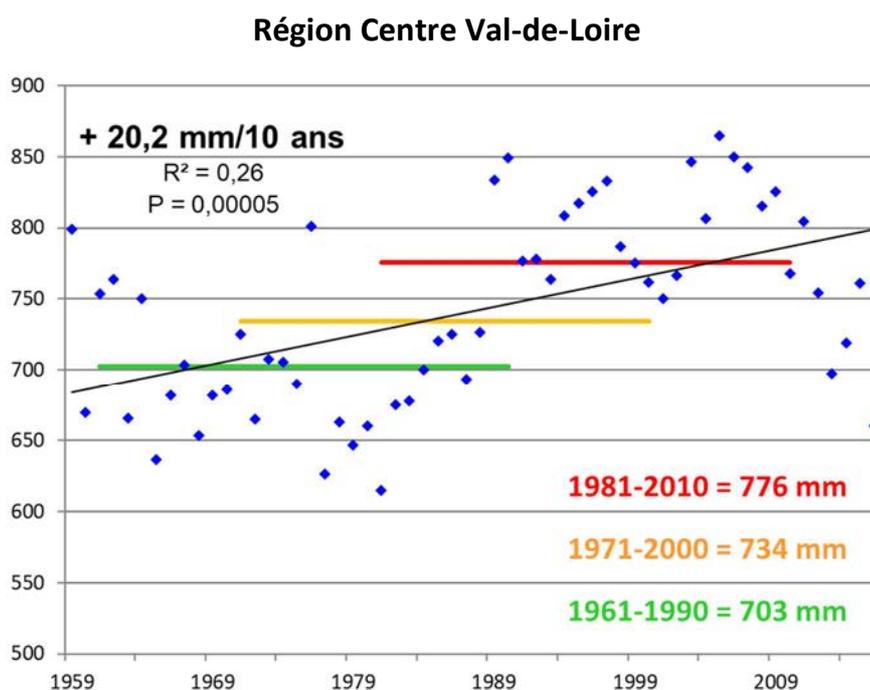
ETP modélisé par la chaîne SIM sur la Région Centre Val-de-Loire

🧮 Calcul de l'indicateur 1

- Cumul sur l'année des évapotranspirations potentielles.
- Tendence linéaire sur la période 1959 – 2017 (courbe noire)
- Moyenne trentenaire du cumul annuel d'ETP (courbe verte : 1961-1990 ; courbe orange : 1971-2000 ; courbe rouge : 1981-2010)

📈 Évolution observée en Région Centre Val-de-Loire

- En abscisse : Années
- En ordonnée : Evapotranspiration potentielle en mm





A6-Cumul annuel d'évapotranspiration potentielle (ETP)

Analyse

L'évapotranspiration est la quantité d'eau transférée vers l'atmosphère sous forme de vapeur (Good et al, 2015) :

- à 64 % par transpiration des plantes (au niveau des stomates des feuilles).
- à 27 % par interceptions des précipitations sur la végétation et directement évaporé
- à 9 % par évaporation des sols et des étendues d'eau

Cette évapotranspiration, difficile à calculer à l'échelle d'une exploitation ou d'un département, va être modélisée. L'évapotranspiration potentielle (ETP), ou demande évaporative de l'atmosphère va dépendre de la température, du rayonnement, du vent et de l'humidité de l'air. Cette ETP va être définie par une référence : disponibilité en eau non limitative et couverture végétale homogène (exemple du modèle de Penman-Monteith).

L'ETP est donc le maximum d'eau (en mm) que peut évaporer le sol et transpirer la plante dans des conditions optimales : sol avec une réserve utile pleine et recouvert d'un «gazon» homogène, sans limitation d'ordre nutritionnel, physiologique ou pathologique.

L'ETP caractérise donc une demande évaporative de l'atmosphère mais ne donne pas de réponse quant aux besoins réels des plantes. L'accroissement de l'évapotranspiration potentielle (en lien étroit avec l'augmentation des températures) traduit une augmentation des besoins en eau des plantes.

L'ETR est une fraction de l'ETP égale à 1 tant que le couvert est en situation hydrique confortable et inférieure dès lors que le manque d'eau dans la zone racinaire contraint le végétal à refermer partiellement les stomates des feuilles.

Dans les déserts chauds, l'évapotranspiration potentielle (ETP) est très importante en raison de la chaleur et l'ensoleillement. Mais l'évapotranspiration réelle (ETR) est très faible, car le manque d'eau disponible pour le sol et les plantes (sécheresse) est un facteur limitant.

L'évolution du cumul annuel des évapotranspirations potentielles en région Centre Val-de-Loire depuis 1959 montre que :

- la tendance linéaire est de 20,2 mm par décennie, soit +117 mm en 59 ans.
- cette tendance est très hautement significative car $P = 0,00005$ (soit 99,995 % de chance que la tendance ne soit pas due au hasard).
- il existe de variations interannuelles importantes ($R^2 = 0,26$)
- Ces évolutions se retrouvent dans la moyenne des régions voisines. Par exemple, + 37 mm par décennie pour la région Poitou-Charentes (soit + 203 mm en 55 ans).

- Les projections climatiques du projet CLIMATOR indiquent une augmentation sensible de l'évapotranspiration potentielle dans le futur proche. A Versailles, on aurait un cumul annuel d'évapotranspiration de + 60 mm entre « 2035 » (moyenne 2020-2049) et « 1985 » (moyenne 1970-1999) (Brisson et al., 2010).

- L'augmentation des évapotranspirations potentielles mise ici en évidence au seul pas de temps annuel ne nous renseigne pas sur la répartition au sein de l'année de cette augmentation (cf. cumul saisonnier d'ETP).



A6-Cumul annuel d'évapotranspiration potentielle (ETP)

A Retenir

Depuis 1959, l'évapotranspiration potentielle annuelle augmente de +20 mm par décennie.

Cet accroissement de l'évapotranspiration découle de l'augmentation des températures. Il devrait par conséquent se poursuivre au cours des prochaines décennies.

Cette augmentation de l'évapotranspiration potentielle annuelle, associée à une stagnation de la pluviométrie, peut être interprétée comme un durcissement des conditions hydriques.

Pour aller plus loin

La caractérisation de l'état hydrique réel des cultures sur cette période d'étude nécessiterait le calcul de l'évapotranspiration réelle¹ des plantes durant les cycles culturaux.

¹ : L'ETR est la quantité totale d'eau que peut évaporer le sol et transpirer la plante lorsque le sol est à son taux d'humidité naturel (où l'eau peut être limitante). Il va dépendre de coefficients culturaux spécifiques pour chaque plante et également de la réserve utile des sols. Des modélisations de l'ETR sont également disponibles.

Pour en savoir plus

COLOMBIE et al, ORACLE Pays de la Loire, 2017, <https://pays-de-la-loire.chambres-agriculture.fr>

MOISSELIN J.M, SCHNEIDER M., CANELLAS M., MESTRE O. (2002) : Les changements climatiques en France au XXème siècle : étude des longues séries homogénéisées de température et de précipitations, La Météorologie n° 38, 45-56.

BRISSON N., LEVRAULT F. ; 2010. Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces. Le Livre Vert du projet CLIMATOR (2007-2010). ADEME.

GOOD S., NOONE D, BOWEN G, « Hydrologic connectivity constrains partitioning of global terrestrial water fluxes », Science, vol. 39, no 6244, 10 juillet 2015, p. 175-177



A7-Cumul saisonnier d'évapotranspiration potentielle (ETP)

Nature et source des données

On utilise des données issues de la chaîne d'analyse spatiale du bilan hydrique « SAFRAN-ISBA MODCOU » (SIM). La chaîne modélise l'indicateur d'ETP sur une grille de 8 x 8 km, dont les valeurs sont calculées en chaque point de la grille et moyennées sur la Région Centre Val-de-Loire.

Données fournies par Météo France

Indicateur 1

ETP modélisé par la chaîne SIM sur la Région Centre Val-de-Loire

Calcul de l'indicateur 1

Cumul sur 3 mois des évapotranspirations potentielles depuis 1959.

- Hiver : Décembre à Février (en bleu)
- Printemps : Mars à Mai (en rouge)
- Été : Juin à Août (en vert)
- Automne : Septembre à Novembre (en violet)

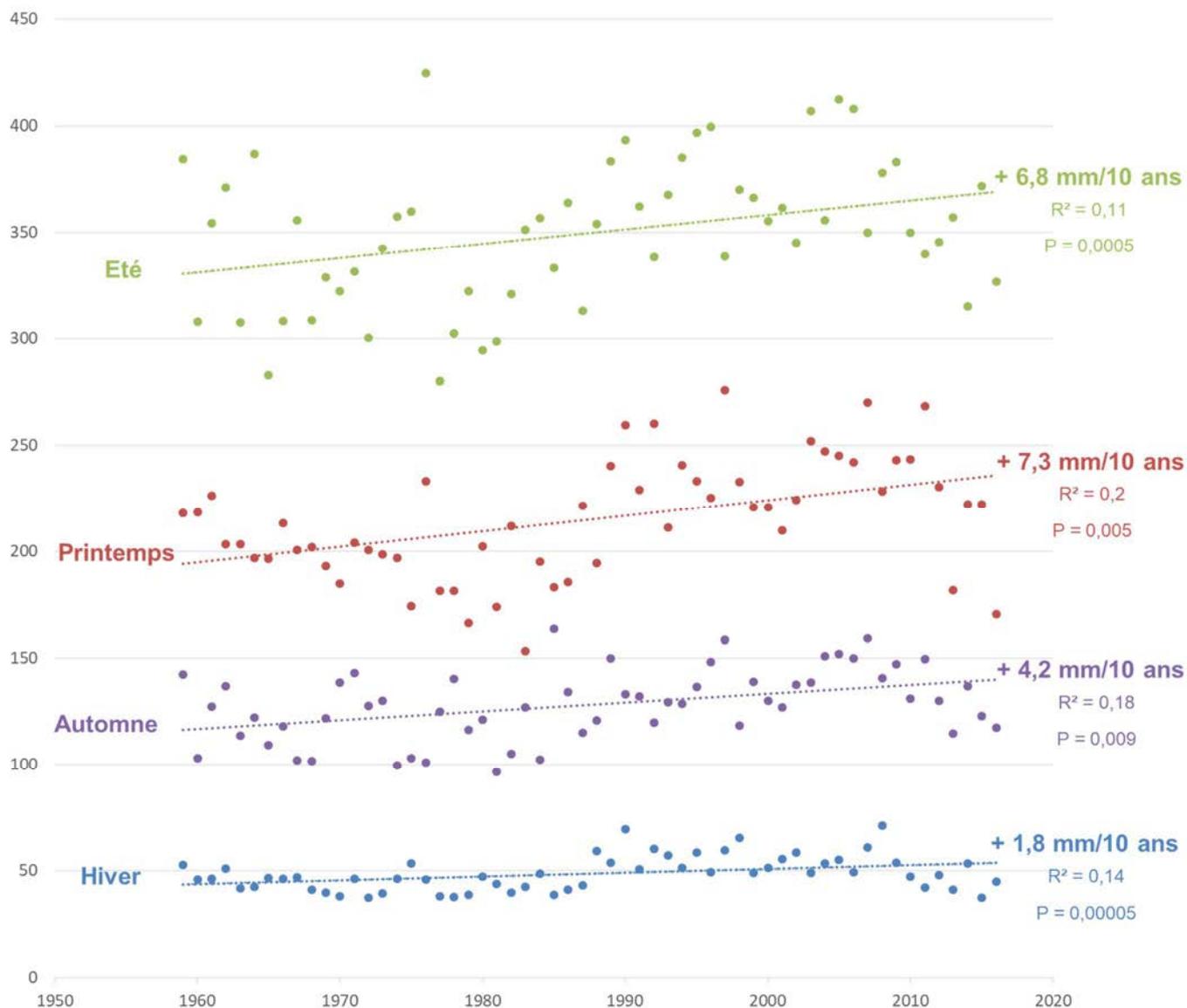
Évolution observée en Région Centre Val-de-Loire

- En abscisse : Années
- En ordonnée : Evapotranspiration potentielle en mm



A7-Cumul saisonnier d'évapotranspiration potentielle (ETP)

Région Centre Val-de-Loire





A7-Cumul saisonnier d'évapotranspiration potentielle (ETP)

Analyse

L'évolution du cumul saisonnier d'évapotranspiration potentielle pour la Région Centre Val-de-Loire montre que :

- Les tendances par ajustement linéaire observées depuis 1959 sont de :
 - + 1,8 mm par décennie en hiver, soit + 10 mm en 59 ans ;
 - + 7,3 mm par décennie au printemps, soit + 43 mm en 59 ans ;
 - + 6,8 mm par décennie en été, soit + 40 mm en 59 ans ;
 - + 4,2 mm par décennie en automne, soit + 24 mm en 59 ans ;
- toutes les saisons montrent une tendance significative à la hausse mais cette augmentation est plus marquée au printemps et en été ;
- de très fortes variations des évapotranspirations potentielles d'une année à l'autre sont présentes ($R^2 < 0,2$).

La tendance à l'augmentation annuelle de l'ETP en Région Centre Val-de-Loire (+ 20 mm/10 ans) s'explique par l'élévation des valeurs de l'ETP sur toutes les saisons (car la tendance est significative dans tous les cas).

Cependant les augmentations sont nettement plus marquées au printemps (37 % du cumul annuel) et en été (34 %) par rapport à l'automne (21%) et à l'hiver (9 %). En faisant le parallèle avec une relative stabilité des précipitations, cette augmentation de l'évapotranspiration implique donc un durcissement des conditions hydriques du printemps et de l'été.

Ces évolutions se retrouvent dans la moyenne des régions voisines. Par exemple, la station du Mans, sur une période de 45 ans, montre une augmentation des ETP (Colombie et al.):

- en hiver de +4 mm/10 ans et à l'automne de de +4 mm/10 ans
- en été de +8 mm/10 ans et au printemps de de +9 mm/10 ans

A Retenir

Depuis 1959, une augmentation des ETP est observée sur toutes les saisons en Région Centre Val-de-Loire, avec le printemps et l'été qui affichent les hausses les plus marquées. Du fait de la relative stabilité des précipitations, cela implique un durcissement des conditions hydriques printanières et estivales.



A7-Cumul saisonnier d'évapotranspiration potentielle (ETP)

Pour aller plus loin

L'étude de la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration potentielle saisonnières permettrait de calculer le déficit hydrique par saison des plantes (voir indicateur déficit hydrique) et pourrait donner une idée de l'évolution du besoin potentiel en irrigation.

Pour en savoir plus

COLOMBIE et al, ORACLE Pays de la Loire, 2017, <https://pays-de-la-loire.chambres-agriculture.fr>



A8-Déficit hydrique climatique (Pluies - ETP)

🔑 Nature et source des données

On utilise des données issues de la chaîne d'analyse spatiale du bilan hydrique « SAFRAN-ISBA MODCOU » (SIM). La chaîne modélise les indicateurs d'ETP et de précipitations sur une grille de 8 x 8 km, dont les valeurs sont calculées en chaque point de la grille et moyennées sur la Région Centre Val-de-Loire.

Données fournies par Météo France

🕒 Indicateur 1

Déficit hydrique climatique annuel

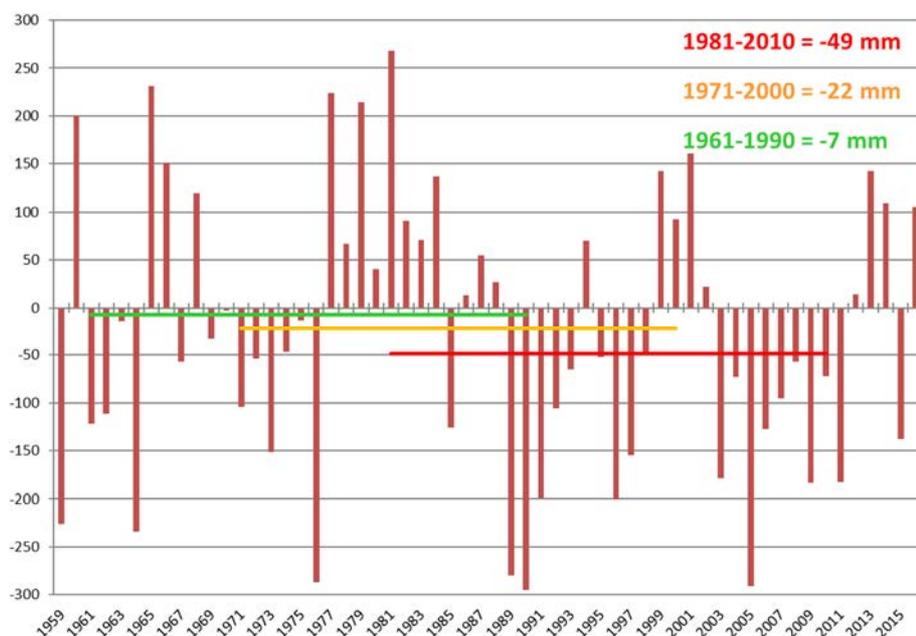
🧮 Calcul de l'indicateur 1

- Déficit hydrique climatique (Précipitations – ETP régionaux) annuel
- Tendence linéaire sur la période 1959 – 2016 (courbe noire)
- Moyenne trentenaire du déficit hydrique climatique (courbe verte : 1961-1990 ; courbe orange : 1971-2000 ; courbe rouge : 1981-2010)

📈 Évolution observée en Région Centre Val-de-Loire

- En abscisse : Années
- En ordonnée : Déficit hydrique climatique en mm

Région Centre Val-de-Loire





A8-Déficit hydrique climatique (Pluies - ETP)

Analyse

- L'évolution du déficit hydrique climatique annuel pour la Région Centre Val-de-Loire depuis 1959 montre une tendance (ajustement linéaire) observée sur l'ensemble de la période de - 8,9 mm par décennie mais qui n'est pas significative ($P=0,44$).
- Le déficit hydrique climatique annuel est extrêmement variable d'une année à l'autre (variabilité inter-annuelle) car R^2 moyen = 0,01.

Indicateur 2

Déficit hydrique climatique saisonnier sur la Région Centre Val-de-Loire

Calcul de l'indicateur 2

Déficit hydrique climatique (Précipitations – ETP régionaux) saisonnier

- Hiver : Décembre à Janvier (en bleu)
- Printemps : Mars à Mai (en rouge)
- Été : Juin à Août (en vert)
- Automne : Septembre à Novembre (en violet)

Tendance linéaire sur la période disponible (courbe noire)

Évolution observée en Région Centre Val-de-Loire

- En abscisse : Années
- En ordonnée : Déficit hydrique climatique en mm

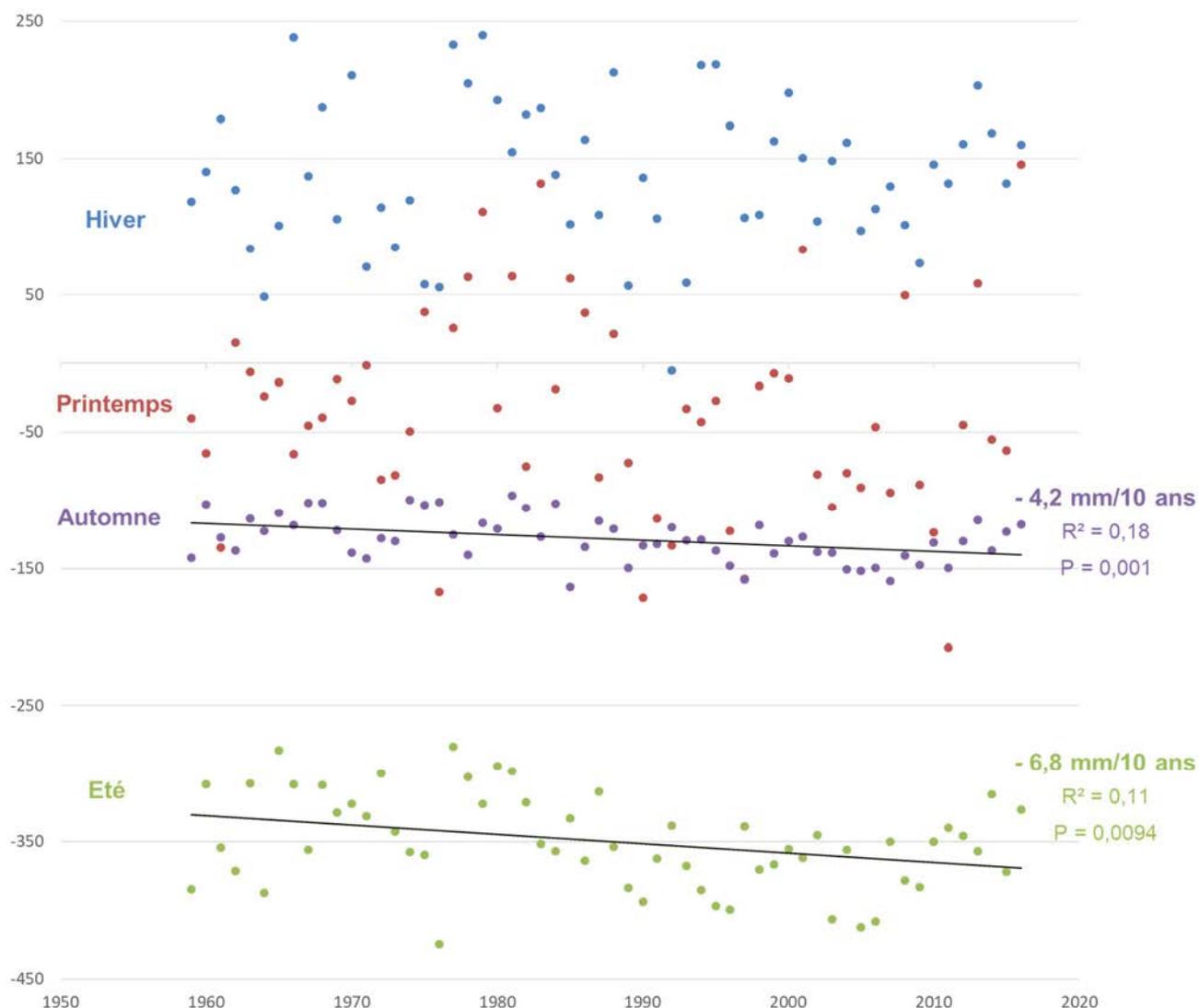
1 CHANGEMENT CLIMATIQUE



Observatoire Régional sur l'Agriculture et le Changement climatique

A8-Déficit hydrique climatique (Pluies - ETP)

Région Centre Val-de-Loire



Analyse

Période	1ères années disponibles	Nb d'années analysées	évolution en mm /10 ans	évolution en mm/58 ans	Test	"Force" de la tendance	R ²
annuelle	1959	58	-8,839	-51,26 mm	0,444	non significative	0,01
hivernale	1959	58	1,291	7,49 mm	0,763	non significative	0,00
printannière	1959	58	-3,855	-22,36 mm	0,516	non significative	0,01
estivale	1959	58	-6,833	-39,63 mm	0,009	hautement significative	0,11
automnale	1959	58	-4,156	-24,11 mm	0,001	hautement significative	0,18



A8-Déficit hydrique climatique (Pluies - ETP)

L'évolution du déficit hydrique climatique saisonnier pour la Région Centre Val-de-Loire montre que :

- Les tendances par ajustement linéaire observées depuis 1959 sont de :
 - + 1,3 mm par décennie en hiver (NS) ;
 - 3,9 mm par décennie au printemps (NS) ;
 - **6,8 mm par décennie en été**, soit - 40 mm en 58 ans ;
 - **4,2 mm par décennie en automne**, soit - 24 mm en 58 ans ;

- Toutes les saisons montrent une tendance à la baisse sauf l'hiver qui présente une tendance à la hausse (+1,3 mm/10 ans) mais non significative. Les saisons estivales et automnales montrent une baisse du déficit hydrique significatif avec respectivement -6,8 mm et -4,2 mm tous les 10 ans.

- De très fortes variations des déficits hydriques d'une année à l'autre sont présentes ($R^2 < 0,2$).

- La transpiration est le moteur du transport de l'eau dans les végétaux. Si l'évapotranspiration de la plante est supérieure à la ressource en eau au niveau des racines, alors la plante est en manque d'eau. Le déficit hydrique est une valeur qui représente le bilan hydrique de la plante via les précipitations minorées de l'évapotranspiration. C'est une valeur de référence car elle est calculée à partir de l'évapotranspiration potentielle (ETP) et non pas réelle. Cette valeur ne retranscrit que les conditions hydriques atmosphériques et ne tient pas compte des spécificités édaphiques (taille de la réserve utile, composition du sol...) et des caractéristiques physiologiques de la plante (positionnement des feuilles, formes des feuilles...).

- Ces données de déficit hydrique corroborent les données des précipitations et de l'ETP puisque :
 - Concernant les précipitations : pas d'observation de tendance marquée quelle que soit la saison pour les 6 stations de la Région Centre Val-de-Loire (sauf 2 stations au nord en été).
 - Concernant l'ETP : une augmentation des ETP est observée sur toutes les saisons en Région Centre Val-de-Loire, avec le printemps et l'été qui affichent les hausses les plus marquées (+ 7 mm par décennie).

Le déficit hydrique étant la soustraction de l'ETP aux précipitations, on retrouve l'été et l'automne comme saison significativement en baisse. Il est surprenant de ne pas voir apparaître le printemps en baisse significative car l'augmentation de l'ETP printanière (+7 mm/décennie) est plus importante que l'ETP automnale (+4 mm/décennie) mais cela peut s'expliquer par les précipitations saisonnières qui possèdent une forte variabilité interannuelle.

- A noter que dans l'ORACLE Pays de la Loire (notamment à Angers et au Mans), il n'a pas été trouvé de tendance significative du déficit hydrique saisonnier (Colombie et al, 2017).



A8-Déficit hydrique climatique (Pluies - ETP)

A Retenir

Depuis 1959, Le bilan hydrique climatique annuel n'a pas évolué de manière significative. Idem pour le bilan hydrique hivernal et printanier. Par contre, le bilan hydrique climatique automnal (-4,2 mm tous les 10 ans) et estival (-6,8 mm tous les 10 ans) a baissé significativement, ce qui implique un durcissement des conditions hydriques à ces périodes.

Pour aller plus loin

Les valeurs de déficit hydrique sont des valeurs de références. Elles ne représentent pas le déficit réel des plantes en eau. Pour connaître l'évolution réelle de l'état hydrique des plantes, il faut compléter cette analyse par des indicateurs représentant la ressource en eau du sol et le type de couverture du sol.

Pour en savoir plus

COLOMBIE et al, ORACLE Pays de la Loire, 2017, <https://pays-de-la-loire.chambres-agriculture.fr>



B1-Nombre de jours échaudants au printemps

Nature et source des données

Séries quotidiennes fournies par Météo France

Indicateurs 1

Séries de 1959 à 2017 sur la station :

- 18 : Bourges
- 28 : Chartres

Séries de 1982 à 2017 sur la station :

- 37 : Tours

Calcul de l'indicateur

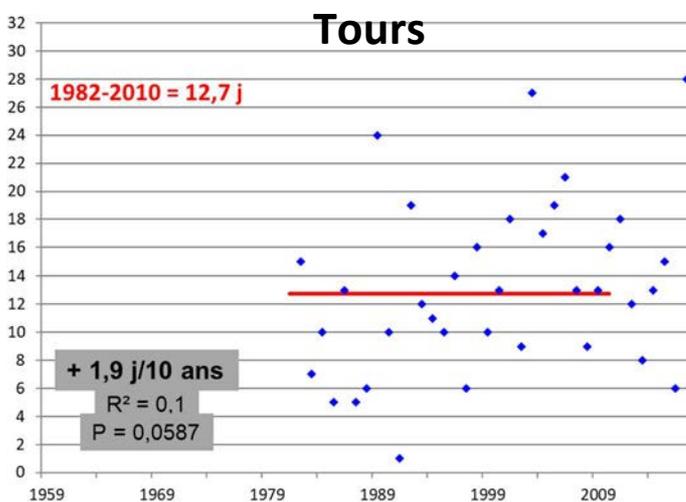
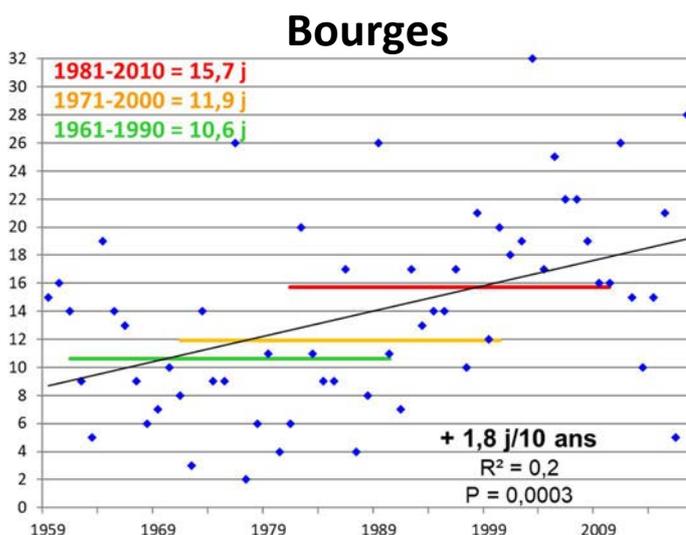
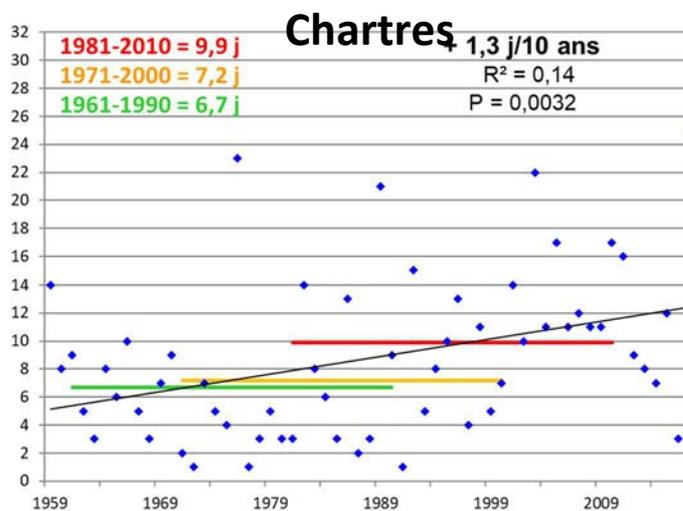
- Nombre de jours où la température maximale journalière est supérieure ou égale à 25°C entre le 1er avril et le 30 juin (nuage de points bleus).
- Tendence linéaire sur la période 1959 – 2017 (courbe noire)
- Moyenne trentenaire du nombre de jours échaudants (courbe verte : 1961-1990 ; courbe orange : 1971-2000 ; courbe rouge : 1981-2010)

Évolution observée

- En abscisse : Années
- En ordonnée : Nombre de jours échaudant



B1-Nombre de jours échaudants au printemps





B1-Nombre de jours échaudants au printemps



Dép.	Stations	1ère année disponible	Nb d'années analysées	évolution /10 ans	évolution /30 ans	Test	"Force" de la tendance	R ²
18	Bourges	1959	59	1,8	5,4	3,4E-04	très hautement significative	0,20
28	Chartres	1959	59	1,3	3,8	3,2E-03	hautement significative	0,14
37	Tours	1959	36	1,3	3,8	0,06	non significative	0,10

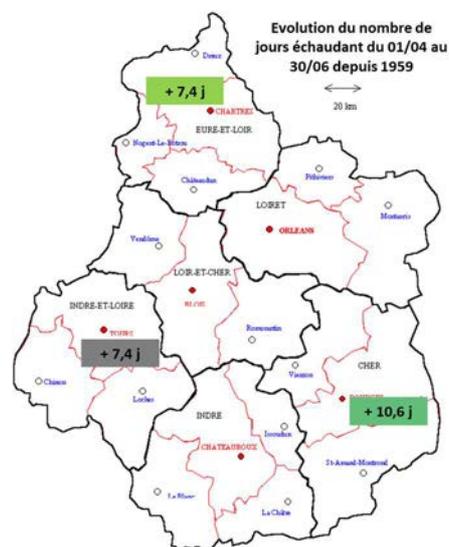
- L'évolution du nombre de jours échaudants du 01/04 au 30/06 montre que les tendances (ajustement linéaire) observées sur l'ensemble de la période sont de :

+1,8 jour échaudant par décennie à Bourges ($P < 0,001$),
+1,3 jour échaudant par décennie à Chartres ($P < 0,001$),
+1,3 jour échaudant par décennie à Tours (NS).

A noter que l'évolution des jours échaudants de la station de Tours est presque significative ($P = 0,06$).

Ces évolutions se retrouvent dans la moyenne des régions voisines. Par exemple :

- +1,9 jour échaudant par décennie à Angers du 01/04 au 31/07 ($P < 0,05$) (Colombie et al, 2017),
- + 1,4 jour échaudant par décennie à Poitiers du 01/04 au 30/06 (Levrault et al, 2015).



- Il existe de très fortes variations annuelles dans le nombre de jours échaudants printaniers (R^2 moyen = 0,17).
- L'évolution du nombre de jours échaudants printaniers semble augmenter de façon très importante (moyenne des stations de Bourges et Chartres) :
 - de 8,7 j à 9,6 j en Avril-Mai-Juin, soit + 0,88 j entre « 1985 » (1961-1990) et « 1975 » (1971-2000)
 - de 9,6 j à 12,8 j en Avril-Mai-Juin, soit + 3,3 j entre « 1995 » (1981-2010) et « 1985 » (1961-1990)

Les températures élevées, si elles se situent pendant le remplissage des grains, ont des répercussions physiologiques (concurrence entre photosynthèse et photorespiration, accroissement de la respiration nocturne, fermeture stomatique) appelées « échaudage thermique », qui pénalisent le rendement. Ce phénomène existe, en particulier chez le blé et le tournesol. Chez les céréales à paille, on considère que ces mécanismes préjudiciables à la production se manifeste à partir de 25°C (Brisson et al., 2010).

La température d'échaudage thermique pour le blé tendre est la même que celle des journées estivales (voir « Nombre de jours estivaux »).

Les céréales à paille subissent de plus en plus de jours à risque en phase de remplissage des grains et devront certainement faire face à une hausse de ces jours avec le réchauffement annoncé. Arvalis annonce que l'augmentation de ce stress thermique est l'une des causes principales de la stagnation des rendements de blé en France (source Arvalis).



B1-Nombre de jours échaudants au printemps

En théorie, le réchauffement climatique entraînera une accélération des cycles végétatifs qui permettra d'esquiver partiellement ces jours échaudants supplémentaires, atténuant ainsi en partie les effets négatifs sur le rendement. Deux voies d'adaptation apparaissent alors : l'avancement des dates de semis et l'amélioration variétale orientée vers le raccourcissement des cycles et la tolérance aux températures élevées.



A retenir

Au cours des 59 dernières années, le nombre moyen de jours échaudant entre le 01/04 et le 30/06 (durée de 91 jours) :

- est passé de 6,7 jours dans les années « 1975 » à 9,9 jours dans les années « 1995 » à Chartres,
- est passé de 10,6 jours dans les années « 1975 » à 15,7 jours dans les années « 1995 » à Bourges,
- est de 12,7 jours dans les années « 1995 » à Tours.

L'évolution tendancielle constatée (ajustement linéaire) sur l'ensemble de la période étudiée (1959 – 2017) est de **+ 1,5 jour échaudant par décennie** entre le 01/04 et le 30/06 mais cette tendance ne semble pas être linéaire au vu de l'évolution des moyennes trentenaires : la différence entre les normales de « 1985 » et « 1975 » et les normales « 1985 » et « 1995 » a été multiplié par 3,7.

Même si des adaptations tels que les choix variétaux ou l'avancée des dates de semis pourraient être envisagées, l'augmentation rapide du nombre de jours échaudants observée est inquiétante. L'augmentation de ce stress thermique serait la cause principale de la stagnation du rendement en blé depuis les années 2000 (voir « Rendement en blé tendre »).



Pour aller plus loin

Au-delà de l'avancement des cycles végétatifs résultant du changement climatique, il est important de noter que l'augmentation des températures se traduit également par un raccourcissement de la période de sensibilité à l'échaudage (remplissage du grain) qui amplifie l'esquive.



Pour en savoir plus

BRISSON N., LEVRAULT F. ; 2010. Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces. Le Livre Vert du projet CLIMATOR (2007-2010). ADEME.

Site d'Arvalis : <https://www.arvalis-infos.fr/une-evolution-des-rendements-differente-selon-les-especes-@/view-20322-arvarticle.html>



B2-Nombre de jours de gel du 1er mars au 30 avril

Nature et source des données

Séries quotidiennes fournies par Météo France

Indicateurs 1

Séries de 1959 à 2017 sur la station :

- 18 : Bourges

Séries de 1982 à 2017 sur la station :

- 37 : Tours

Calcul de l'indicateur

- Nombre de jours où la température minimale est inférieure ou égale à 0°C du 1er mars au 30 avril (nuage de points bleus).
- Tendence linéaire sur la période 1959 – 2017 (courbe noire)
- Moyenne trentenaire du nombre de jours de gel au printemps (courbe verte : 1961-1990 ; courbe orange : 1971-2000 ; courbe rouge : 1981-2010)

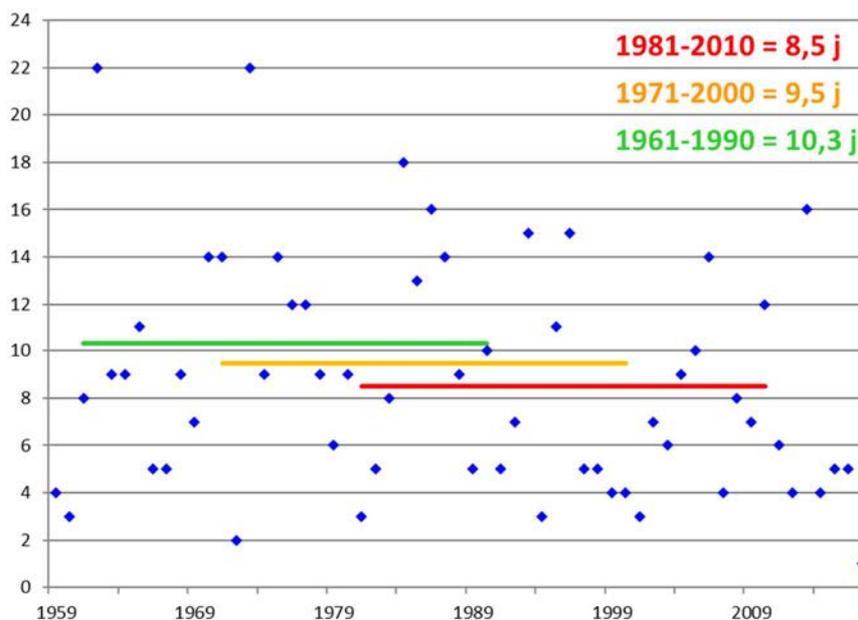
Évolution observée

- En abscisse : Années
- En ordonnée : Nombre de jours de gel du 1er mars au 30 avril

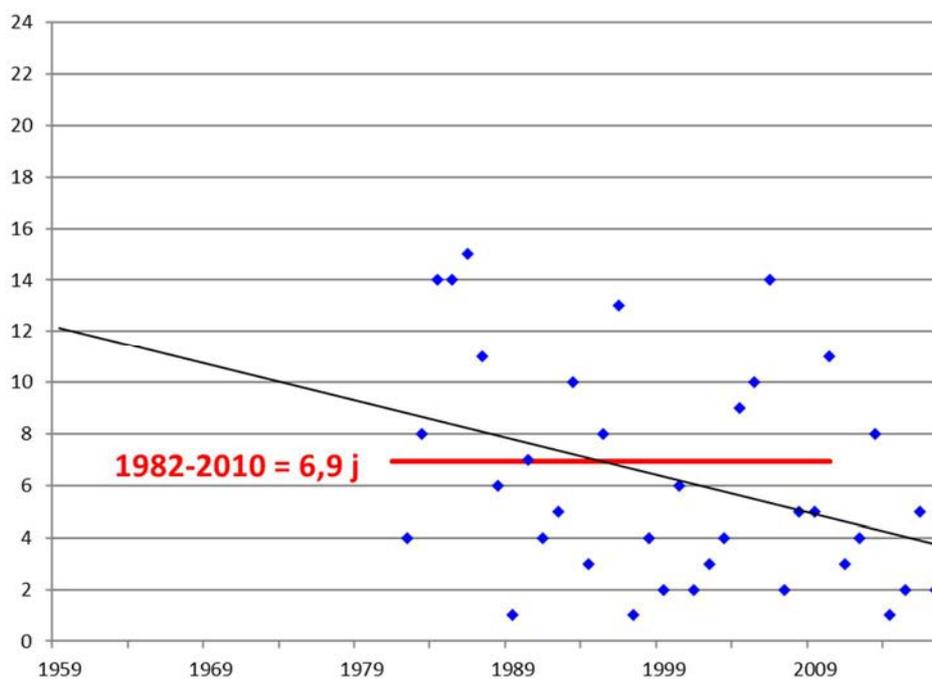


B2-Nombre de jours de gel du 1er mars au 30 avril

Bourges



Tours





B2-Nombre de jours de gel du 1er mars au 30 avril



Dép.	Stations	1ère année disponible	Nb d'années analysées	évolution /10 ans	évolution /30 ans	Test	"Force" de la tendance	R ²
18	Bourges	1959	59	-0,6	-1,9	0,09	non significative	0,05
37	Tours	1982	36	-1,4	-4,3	0,03	significative	0,13

L'évolution du nombre de jours de gel du 1^{er} mars au 30 avril en Région Centre Val-de-Loire depuis 1959 (1982 pour la station de Tours) montre que les tendances (ajustement linéaire) observées sur l'ensemble de la période sont de :

- 0,6 j par décennie à Bourges (NS)
- **1,4 j par décennie** à Tours, soit - 4,3 j en 30 ans

- A noter que la tendance est presque significative à Bourges (P=0,09).

- La station de Tours montre une tendance significative à la baisse malgré une période courte de mesures (36 années). En 36 ans, le nombre de jours de gel a diminué de 57 % pendant le mois de mars et avril (51 jours) en passant de 1 jour sur 7 en 1982 à 1 jour sur 16 en 2017.

- Ces évolutions se retrouvent dans la moyenne des régions voisines. Par exemple :

- **0,9 j par décennie** à Cognac (Levrault et al, 2015),
- **1,1 j par décennie** à Angers (Colombie et al, 2017),
- **1,4 j par décennie** au Mans (Colombie et al, 2017),

- On observe une raréfaction du nombre de jours de gel de mars à avril mais la variation interannuelle extrêmement importante (R²=0,13) fait que cette période de l'année reste sujette à des risques de gel.

La diminution du nombre de jours de gel de mars à avril est cohérente avec la diminution du nombre de jours de gel dans l'année (voir « Nombre de jours de gel annuel » et « Début et fin de la période de gel »).

La période du 1^{er} mars au 30 avril correspond à la période de réveil de la végétation de plusieurs cultures pérennes et de la plantation des cultures de printemps. C'est une phase où les végétaux développent des organes plus sensibles aux froides températures. Par exemple, la vigne est très sensible aux températures inférieures à 0°C, en particulier celles de -2,5°C (Reynier 2007) et peuvent causer la mortalité des bourgeons primaires ou des jeunes pousses ; idem en arboriculture. Le gel est également une problématique pour la culture du maïs qui est une plante sensible aux basses températures, de par son origine tropicale (Arvalis, 2016).

Les plantes ayant un développement plus précoce, de par le réchauffement de la saison printanière, se trouveront alors sujettes au risque de gel printanier, malgré la diminution du nombre de jours à risque (Dubreuil et al., 2012).



B2-Nombre de jours de gel du 1er mars au 30 avril



A retenir

Le nombre de jours de gel du 1^{er} mars au 30 avril est en diminution sur la station de Tours qui ne possède que 36 années de mesure alors que la tendance est moins nette sur la station de Bourges (NS).

Malgré cette tendance, l'avancement des stades phénologiques des cultures et la très forte variation interannuelle du nombre de gelées font que le risque de gel reste une problématique pour la vigne, l'arboriculture, voire quelques cultures de printemps.



Pour aller plus loin

Une étude approfondie de l'avancement du débourrement des végétaux (notamment la vigne) permettrait de mieux caractériser le risque de gel printanier.



Pour en savoir plus

ARVALIS. ; 2016. Gel, de la levée à 8-10 feuilles. Les fiches accidents Maïs. [en ligne]. Disponible sur : http://www.fiches.arvalis-infos.fr/fiche_accident/fiches_accidents.php?mode=fa&type_cul=3&type_acc=5&id_acc=154 Consulté le 8/01/2019

DUBREUIL V., BONNARDOT V., QUÉNOL H., BIGOT S., HUARD F., DEQUE M. ; 2012 : Le climat de la France de l'Ouest au XXI^{ème} siècle : que disent les modèles ? In MÉROT Ph., DUBREUIL V., DELAHAYE D., DESNOS Ph.: Changement climatique dans l'Ouest, Presses Universitaires de Rennes, chap. 4, 57-72.

Reynier A (2007) Manuel de viticulture. Ed. Lavoisier Tec et Doc, Paris



B3-Début, durée et fin de la période de gel

Nature et source des données

Séries quotidiennes fournies par Météo France

Indicateurs 1 : Date de la première gelée « entrée d'hiver » et de la dernière gelée « sortie d'hiver »

Séries de 1959 à 2017 sur la station :

- 18 : Bourges
- 28 : Chartres

Séries de 1963 à 2017 sur la station :

- 36 : Pellevoisin

Calcul de l'indicateur 1

- Evolution des dates de la première journée en automne et de la dernière journée au printemps où la température minimale journalière est inférieure ou égale à 0°C (nuage de points bleus).
- Tendence linéaire sur la période 1959 – 2017 (courbe noire)
- Moyenne trentenaire (courbe verte : 1961-1990 ; courbe orange : 1971-2000 ; courbe rouge : 1981-2010)

Évolution observée

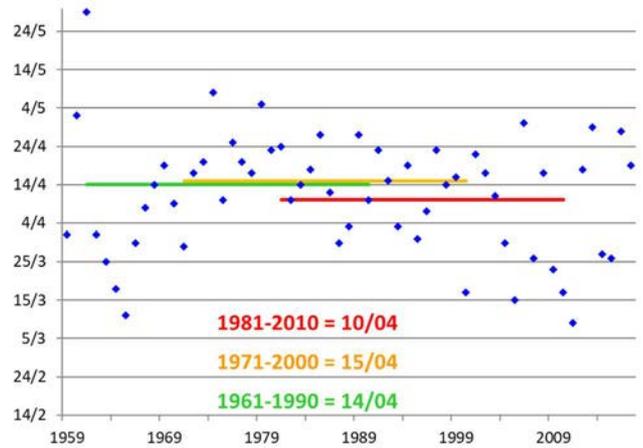
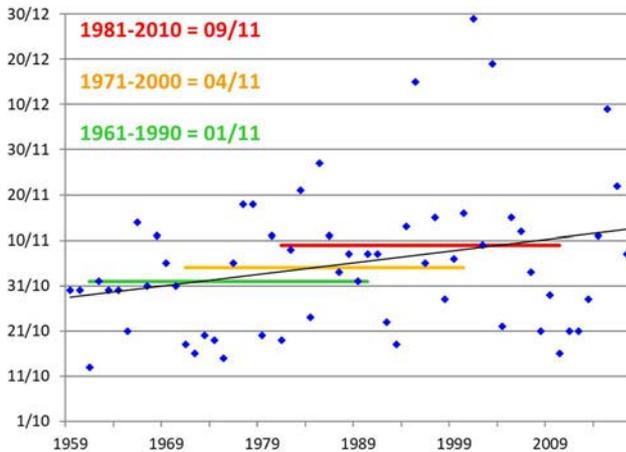
- En abscisse : Années
- En ordonnée : Date



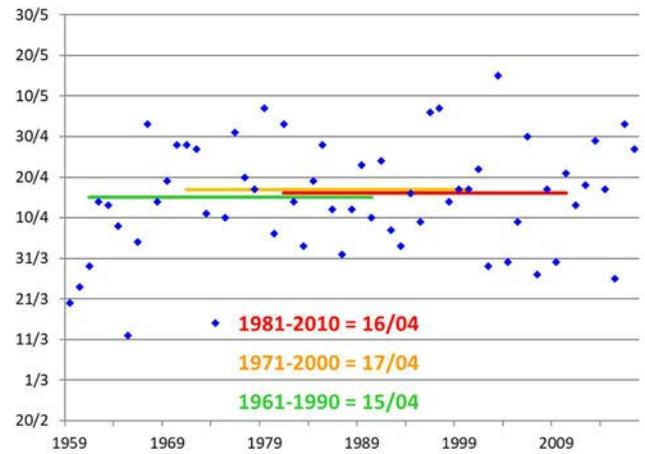
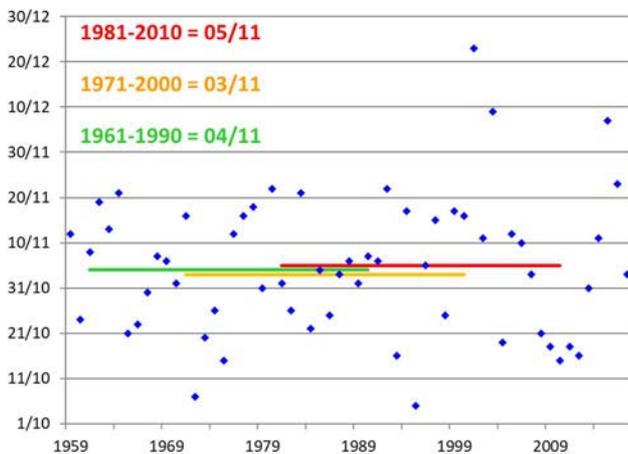
Date de la première gelée entrée hiver

Date de la dernière gelée sortie hiver

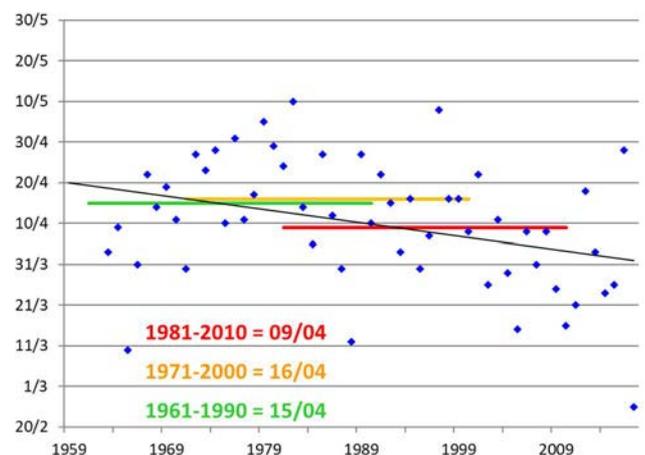
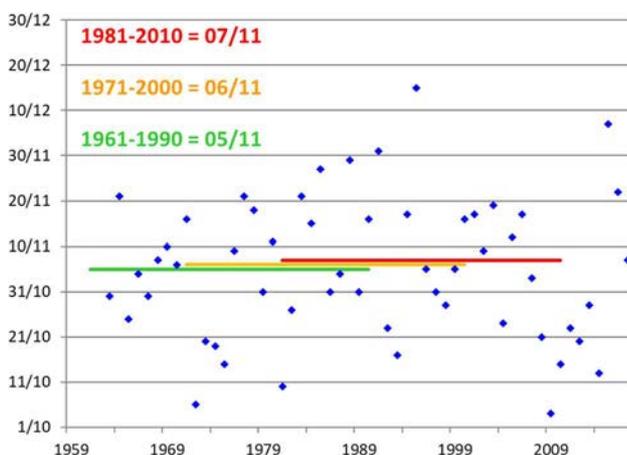
Bourges



Chartres



Pellevoisin





B3-Début et fin de la période de gel



Date de la première gelée entrée hiver

Dép.	Stations	1ère année disponible	Nb d'années analysées	évolution /10 ans	évolution /30 ans	Test	"Force" de la tendance	R ²
18	Bourges	1959	59	2,6	7,7	0,04	significative	0,08
28	Chartres	1959	59	0,6	1,7	0,63	non significative	0,004
36	Pellevoisin	1963	55	0,1	0,2	0,97	non significative	0,00003

L'évolution de la date de la première journée de gel entrée hiver depuis 1959 (1963 pour la station de Pellevoisin) montre que les tendances (ajustement linéaire) observées sur l'ensemble de la période sont de :

- + **2,6 j par décennie** à Bourges (P=0,04), soit + 15 j en 59 ans.
- 0,6 j par décennie à Chartres (NS)
- 0,1 j par décennie à Pellevoisin (NS)

- Cet indicateur est extrêmement variable d'une année à l'autre (variabilité inter-annuelle) car R² = 0,08.

- Ces évolutions se retrouvent en-dessous de la moyenne des régions voisines. Par exemple :
+ 4 j par décennie à Angers (P<0,1) depuis 1971 (Colombie et al., 2017)

Date de la dernière gelée sortie hiver

Dép.	Stations	1ère année disponible	Nb d'années analysées	évolution /10 ans	évolution /30 ans	Test	"Force" de la tendance	R ²
18	Bourges	1959	59	-1,3	-4,0	0,27	non significative	0,02
28	Chartres	1959	59	1,6	4,9	0,12	non significative	0,04
36	Pellevoisin	1963	55	-3,2	-9,7	0,01	significative	0,11

L'évolution de la date de la dernière gelée sortie hiver depuis 1959 (1963 pour la station de Pellevoisin) montre que les tendances (ajustement linéaire) observées sur l'ensemble de la période sont de :

- 1,3 j par décennie à Bourges (NS)
- + 1,6 j par décennie à Chartres (NS)
- **3,2 j par décennie** à Pellevoisin (P=0,01), soit - 19 j en 59 ans.

- Cet indicateur est très variable d'une année à l'autre (variabilité inter-annuelle) car R² = 0,1.

- Ces évolutions se retrouvent en-dessous de la moyenne des régions voisines. Par exemple :
- 4,4 j par décennie à Angers (P<0,05) depuis 1971 (Colombie et al., 2017)



B3-Début et fin de la période de gel



Indicateurs 2 : Durée de la période de gel

Séries de 1959 à 2017 sur la station :

- 18 : Bourges
- 28 : Chartres

Séries de 1963 à 2017 sur la station :

- 36 : Pellevoisin



Calcul de l'indicateur 2

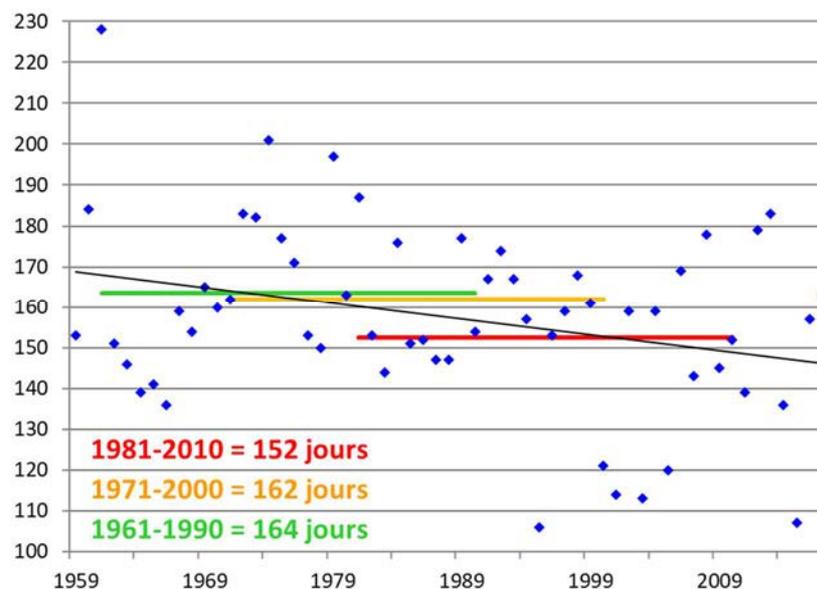
- Evolution de la période en nombre de jours entre la première gelée automnale de l'année n et la dernière gelée printanière de l'année n+1 (nuage de points bleus)
- Tendence linéaire sur la période 1959 – 2017 (courbe noire)
- Moyenne trentenaire (courbe verte : 1961-1990 ; courbe orange : 1971-2000 ; courbe rouge : 1981-2010)



Évolution observée

- En abscisse : Années
- En ordonnée : Nombre de jours

Bourges





B3-Début et fin de la période de gel



Durée de la période de gel

Dép.	Stations	1ère année disponible	Nb d'années analysées	évolution /10 ans	évolution /30 ans	Test	"Force" de la tendance	R ²
18	Bourges	1959	59	-3,9	-11,7	0,02	significative	0,09
28	Chartres	1959	59	1,1	3,2	0,45	non significative	0,01
36	Pellevoisin	1963	55	-3,3	-9,9	0,08	non significative	0,06

L'évolution de la durée de la période de gel depuis 1959 (1963 pour la station de Pellevoisin) montre que les tendances (ajustement linéaire) observées sur l'ensemble de la période sont de :

- **3,9 j par décennie** à Bourges (P=0,04), soit - 23 j en 59 ans.
- 1,1 j par décennie à Chartres (NS)
- 3,3 j par décennie à Pellevoisin (NS)

- A noter que la tendance est presque significative à Pellevoisin (P=0,08).

- Cet indicateur est extrêmement variable d'une année à l'autre (variabilité inter-annuelle) car R² = 0,09.

- Ces évolutions se retrouvent en-dessous de la moyenne des régions voisines. Par exemple :
- 8,4 j par décennie à Angers (P<0,1) depuis 1971 (Colombie et al., 2017)

Les stations de Bourges et *Pellevoisin* (*car presque significatif*) montrent une diminution de la durée de la période de gel d'environ **-3,6 jours par décennie** expliquée par :

- une première gelée automnale plus tardive à Bourges : **+ 2,6 j par décennie**
- une dernière gelée printanière plus précoce à Pellevoisin : **- 3,2 j par décennie**

Par contre, à Chartres, on ne distingue pas d'évolution significative de la durée de la période de gel, ni de la date de première ou de dernière gelée. Chartres ne semble pas avoir de modification significative de sa période de gel. La ville du Mans, situé à proximité de Chartres, est dans la même situation (Colombie et al., 2017).

Le nombre de jours de gel annuel tend à diminuer sur pratiquement toutes les stations départementales d'environ 4 jours par décennie (voir « Nombre de jours de gel »). Pourtant si ce nombre de jours de gel tend à diminuer annuellement, il semblerait que la durée de la période de gel diminue également (à part Chartres). Par contre, le décalage de la période de gel (gelée automnale plus tardive ou gelée printanière plus précoce) n'est pas clairement établi. Il semble que la forte variabilité inter annuelle laissera apparaître certaines années des valeurs équivalentes à celles d'aujourd'hui au cours du XXI^{ème} siècle. Les plantes ayant une avancée des cycles végétatifs de par le réchauffement climatique, se trouveront alors sujettes au risque de gel printanier, malgré la diminution du nombre de jours de gel annuel (Dubreuil et al., 2012).



B3-Début et fin de la période de gel



A retenir

Les stations de sud de la Loire montrent une diminution de la durée de la période de gel d'environ -3,6 jours par décennie.

Le décalage éventuel de la période de gel (gelée entrée hiver plus tardive ou gelée sortie hiver plus précoce) n'est pas clairement établi.

Au nord de la Loire, Chartres ne semble pas avoir de modification significative de sa période de gel.

Ainsi, malgré la diminution du nombre de jour de gel annuel avérée, il n'est pas clairement établi que la période de gel printanière se termine de plus en plus tôt, le risque de gel printanier semble donc toujours présent.



Pour en savoir plus

COLOMBIE et al, ORACLE Pays de la Loire, 2017, <https://pays-de-la-loire.chambres-agriculture.fr>

DUBREUIL V., BONNARDOT V., QUÉNOL H., BIGOT S., HUARD F., DEQUE M. ; 2012 : Le climat de la France de l'Ouest au XXIème siècle : que disent les modèles ? In MÉROT Ph., DUBREUIL V., DELAHAYE D., DESNOS Ph.: Changement climatique dans l'Ouest, Presses Universitaires de Rennes, chap. 4, 57-72.



B4-Indice de Winkler

Nature et source des données

Séries quotidiennes fournies par Météo France

Indicateurs 1 : Indice de Winkler en °C.j

Séries de 1959 à 2017 sur la station :

- 18 : Bourges

Séries de 1982 à 2017 sur la station :

- 37 : Tours

L'indice de Winkler est basé sur le principe des degrés-jours de croissance, il calcule la somme des températures moyennes journalières au-dessus de 10°C, sur une période de sept mois. Il estime ainsi le potentiel thermique d'une région viticole.

Calcul de l'indicateur

- Cumul des températures moyennes journalières à partir de la base de 10°C (zéro de végétation de la vigne) pour la période du 1er avril au 31 octobre (nuage de points bleus).
- Tendence linéaire sur la période 1959 – 2017 (courbe noire)
- Moyenne trentenaire de l'indice de Winkler (courbe verte : 1961-1990 ; courbe orange : 1971-2000 ; courbe rouge : 1981-2010)

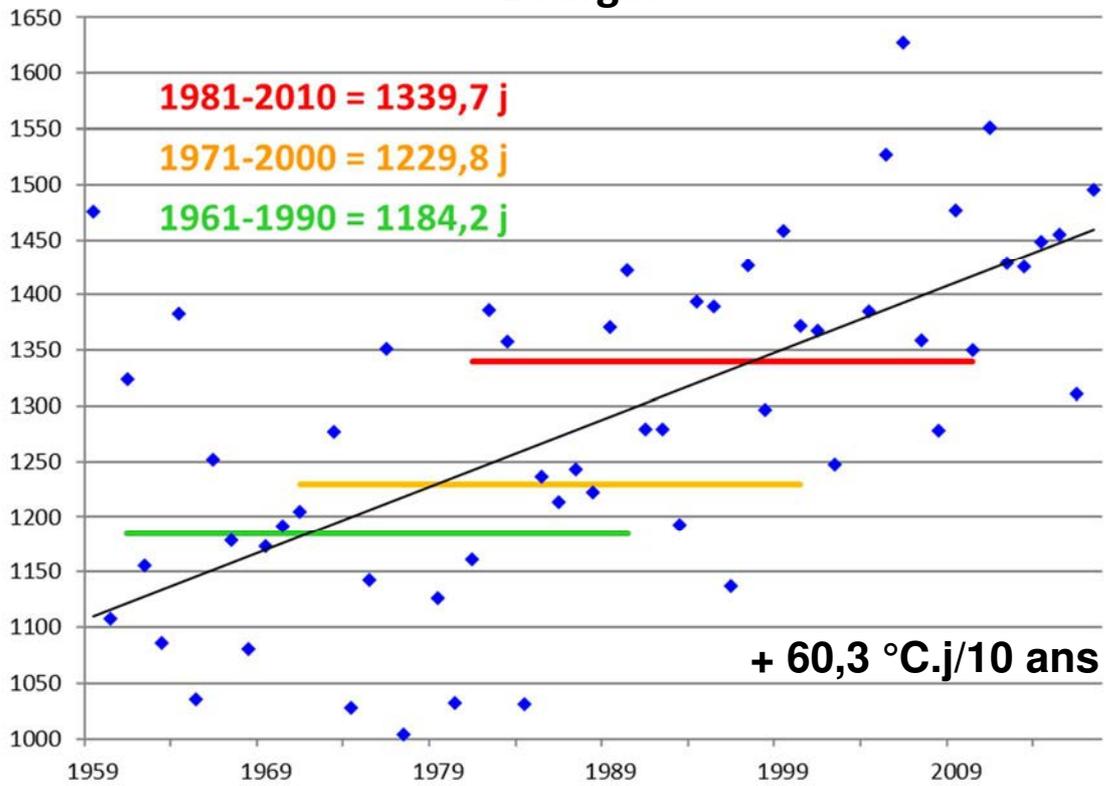
Évolution observée

- En abscisse : Années
- En ordonnée : Indice de Winkler

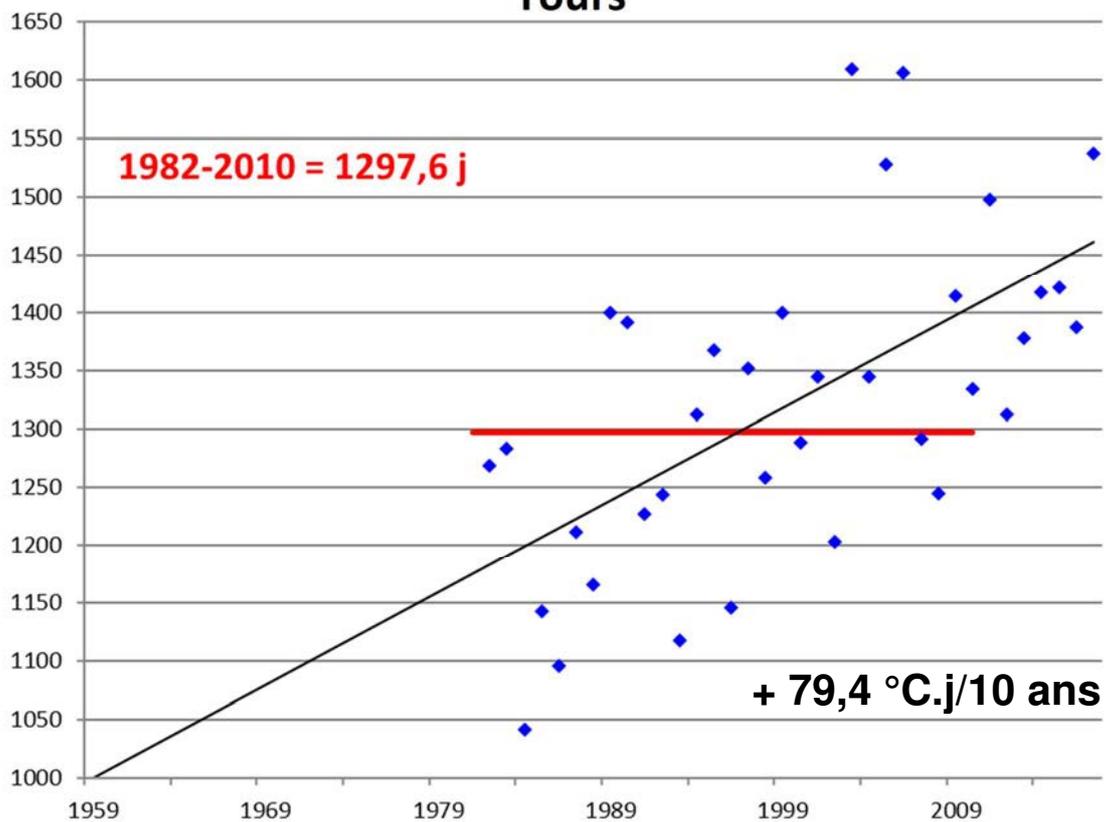


B4-Indice de Winkler

Bourges



Tours





B4-Indice de Winkler



Dép.	Stations	1ère année disponible	Nb d'années analysées	évolution /10 ans	évolution /30 ans	Test	"Force" de la tendance	R ²
18	Bourges	1959	59	60,3	180,8	3,0E-07	très hautement significative	0,37
37	Tours	1982	36	79,4	238,2	7,6E-05	très hautement significative	0,37

L'évolution de l'indice de Winkler du 1er avril au 31 octobre depuis 1959 (1982 pour la station de Tours) montre que les tendances (ajustement linéaire) observées sur l'ensemble de la période sont de :

- + 60,3 °C.j par décennie à Bourges, soit + 356 °C.J en 59 ans
- + 79,4 °C.j par décennie à Tours, soit + 238 °C.J en 30 ans

- L'indice de Winkler est moyennement variable d'une année à l'autre (variabilité inter-annuelle) car R² moyen = 0,4.

- Ces évolutions se retrouvent au-dessus de la moyenne des régions voisines. Par exemple :
 + 45,5 °C.J par décennie à Saumur en 60 ans (P<0,01)
 + 56 °C.J par décennie à Angers en 60 ans (P<0,01)



Indicateurs 2 : Classes des indices de Winkler

Séries de 1959 à 2017 sur la station :

- 18 : Bourges



Calcul de l'indicateur

Classement des indices de Winkler selon les classes climatiques (défini par Winkler et al. 1974) pour différentes moyennes trentennaires (1961-1990 ; 1971-2000 ; 1981-2010)



Évolution observée

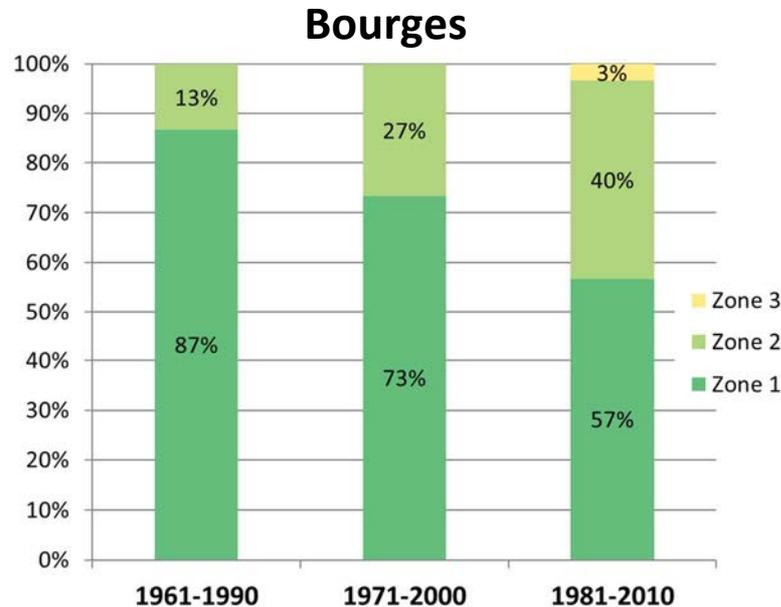
- En abscisse : Classes des indices de Winkler
- En ordonnée : Pourcentage

L'indice de Winkler est classé en 5 zones climatiques selon le tableau ci-dessous :

Zone	°C.jours	Exemples : Villes (Pays)
5	$x \geq 2205$	Jerez (E), Hunter (Aus), Palerme (I), Fresno (USA)
4	$1927 \leq x < 2205$	Venise (I), Mendoza (Arg), Stellenbosch (RSA)
3	$1650 \leq x < 1926$	Montpellier (F) , Milan (I), Porto (P), Napa (USA)
2	$1371 \leq x < 1649$	Rioja (E), Côtes du Rhône (F) , Barolo (I), Santiago (C)
1	$x < 1371$	Geisenheim (D), Champagne (F), Dijon, (F), Bordeaux (F)



B4-Indice de Winkler



A Bourges :

- la classe 1 de Winkler ($IW < 1371 \text{ } ^\circ\text{C.j}$) s'est déroulée 9 années sur 10 de 1961-1990, 7 années sur 10 de 1971-2000 puis 6 années sur 10 de 1981-2010.

- alors que la zone 2 s'est déroulée 1 année sur 10 de 1961-1990, 3 années sur 10 de 1971-2000 puis 4 années sur 10 de 1981-2010.

Même si la classe 1 de Winkler, caractéristique des cépages locaux, reste majoritaire (6 années sur 10), sa fréquence a fortement diminué au cours du XXème siècle.

Analyse

L'indice de Winkler est en augmentation significative dans les deux stations étudiées. Cette hausse est parallèle à la hausse des températures moyennes annuelles et saisonnières (voir « Température moyenne annuelle » et « Température moyenne saisonnière »).

La plupart des végétaux ont besoin d'un certain cumul de températures pour accomplir leurs phases phénologiques (débourrement, floraison, maturité...). L'indice de Winkler permet de connaître l'offre disponible de température pour la vigne et permet aussi de prévoir les dates des stades phénologiques.

L'apport de chaleur supplémentaire a pour effet de raccourcir les phases phénologiques et donc d'avancer les stades clés de la vigne (Neethling et al., 2011) comme par exemple les dates de vendanges (voir « Dates de vendanges »). La hausse de l'indice de Winkler entraîne également un avancement de la date de débourrement.

Or, la vigne est très sensible aux températures inférieures à 0°C , en particulier celles de $-2,5^\circ\text{C}$ (Reynier 2007) qui peuvent causer la mortalité des bourgeons primaires ou des jeunes pousses, ce qui retarde le développement végétatif et réduit le rendement, dont les conséquences ne sont pas seulement pour l'année en cours, mais également pour l'année suivante (Jackson 2008).



B4-Indice de Winkler

Ainsi, même si le nombre de jours de gel annuel diminue sensiblement, l'évolution de la date de dernière gelée n'a pas de tendance claire. La forte augmentation de l'indice de Winkler entraîne une avancée de la date de débourrement de la vigne, ce qui a pour conséquence de maintenir le risque de gel à ce stade phénologique critique.

De plus la forte variabilité interannuelle du nombre de jours de gel au printemps et de la dernière date de gelée printanière fait que malgré la diminution moyenne du nombre de jours de gel sur cette période, les risques de gel restent présents certaines années.



A retenir

L'indice de Winkler est en forte augmentation significative sur 2 stations de la Région (+ 356 °C.J en 59 ans à Bourges).

La classe 1 de Winkler ($IW < 1371$ °C.j) avait lieu 9 années sur 10 dans les années « 1975 » et 6 années sur 10 dans les années « 1995 ».

Cette hausse entraîne un avancement des stades phénologiques de la vigne, notamment le débourrement qui est un stade critique pour la vigne. Ainsi le risque de gel est maintenu voire accru, provoqué par l'avancement du débourrement et par la variabilité interannuelle de la dernière date de gelée printanière, et ce malgré un nombre de jours de gel annuel sensiblement en baisse.



Pour en savoir plus

Jackson R S (2008) Wine science: principles and applications. Ed. Academic Press, New York

Neethling. E. Adaptation de la viticulture au changement climatique : vers des stratégies à haute résolution. Géographie. Université Rennes 2, 2016. Français.

Reynier A (2007) Manuel de viticulture. Ed. Lavoisier Tec et Doc, Paris



B5-Indice de fraîcheur des nuits du 1er au 30 septembre

Nature et source des données

Séries quotidiennes fournies par Météo France

Indicateurs 1 : indice de fraîcheur des nuits en °C

Séries de 1959 à 2017 sur la station :

- 18 : Bourges

Séries de 1982 à 2017 sur la station :

- 37 : Tours

La maturation des raisins se situe entre la véraison et la vendange pendant le mois de septembre. C'est une période essentielle pour la qualité future de la récolte, puisque s'y déroule la synthèse des composés organiques influençant la typicité du vin (sucres, acidité, polyphénols, précurseurs d'arômes).

Il est avéré que des températures diurnes élevées et des températures nocturnes fraîches sont essentielles pour préserver l'équilibre entre le sucre et l'acidité (Carey et al., 2008). Des températures fraîches, notamment en particulier celles nocturnes, sont aussi propices à l'expression des arômes.

Pour mesurer ce risque, Tonietto et Carbonneau ont défini l'indice de fraîcheur des nuits (IFN : moyenne des minima thermiques durant le mois de septembre), qui permet d'évaluer les conditions nycthermiques pendant la maturation.

Le changement climatique étant susceptible d'affecter les conditions de maturation du raisin, il est important d'observer sur le long terme si l'indice de fraîcheur des nuits montre une évolution particulière.

Calcul de l'indicateur

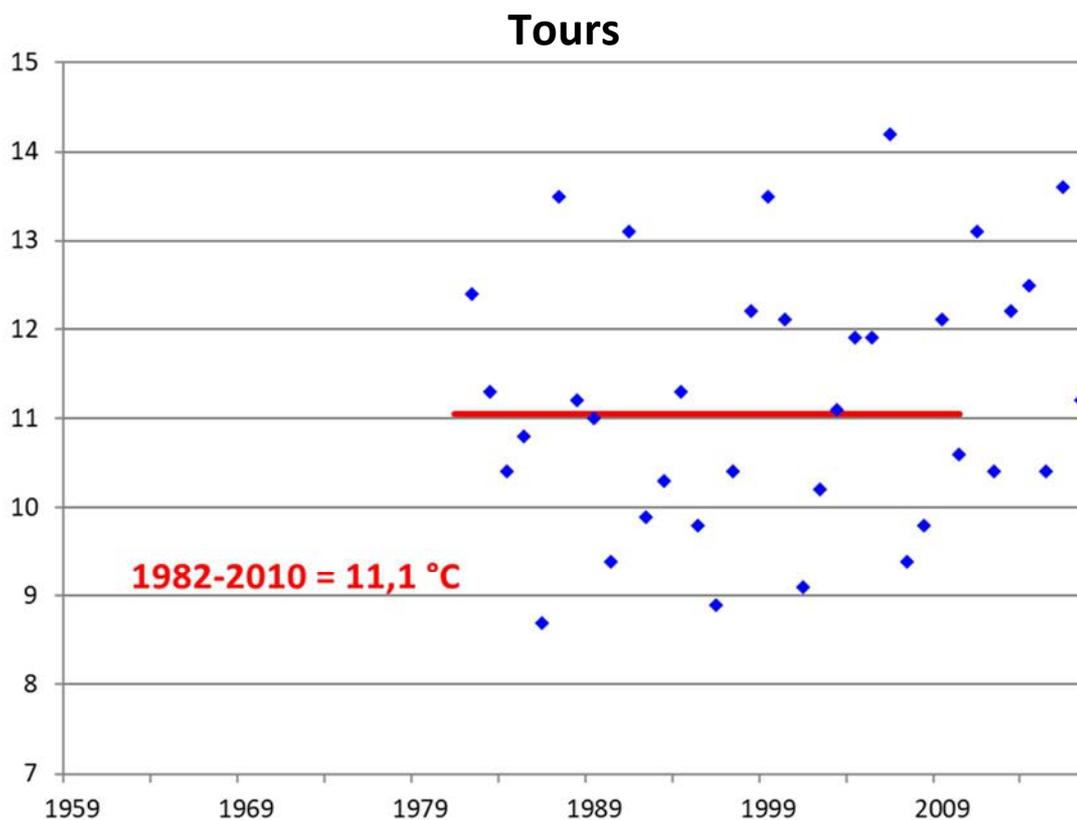
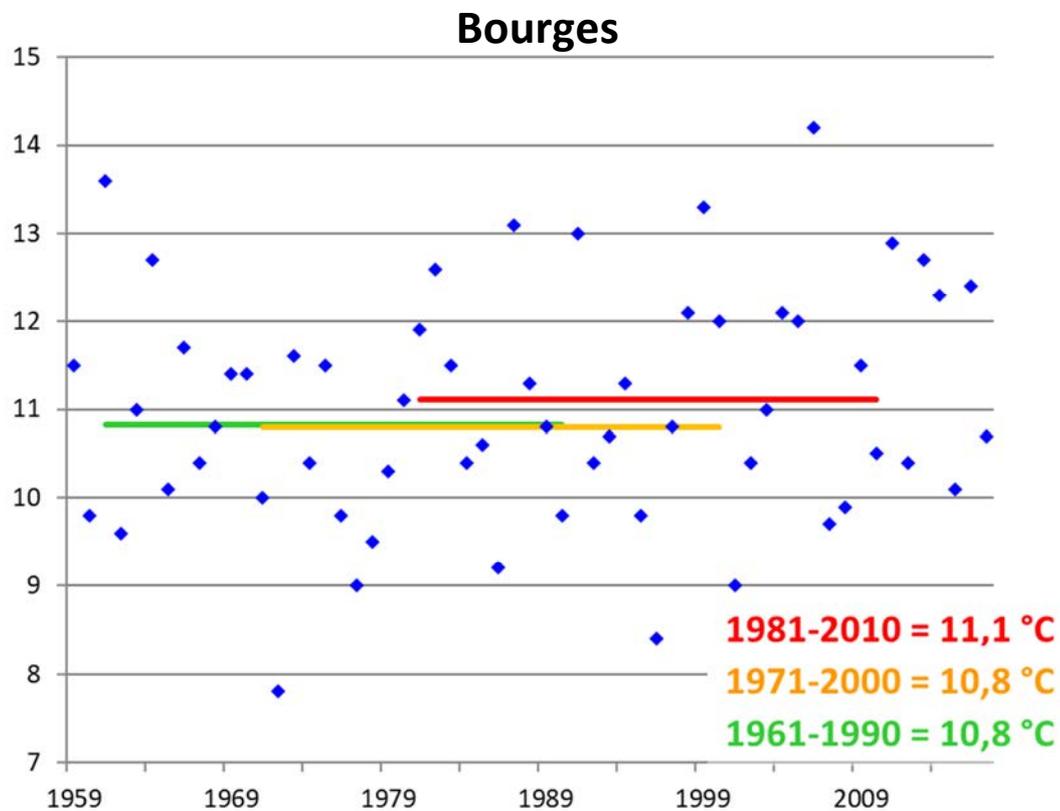
- Moyenne des températures minimales journalières du mois de septembre (nuage de points bleus).
- Tendence linéaire sur la période 1959 – 2017 (courbe noire)
- Moyenne trentenaire du nombre de jours estivaux (courbe verte : 1961-1990 ; courbe orange : 1971-2000 ; courbe rouge : 1981-2010)

Évolution observée

- En abscisse : Années
- En ordonnée : Indice de fraîcheur des nuits au mois de septembre



B5-Indice de fraîcheur des nuits du 1er au 30 septembre





B5-Indice de fraîcheur des nuits du 1^{er} au 30 septembre

Analyse

Dép.	Stations	1ère année disponible	Nb d'années analysées	évolution /10 ans	évolution /30 ans	évolution /59 ans	Test	"Force" de la tendance	R ²
18	Bourges	1959	59	0,1	0,3	0,7 j	0,26	non significative	0,02
37	Tours	1982	36	0,3	0,8	1,5 j	0,27	non significative	0,04

On ne constate aucune évolution de l'indice de fraîcheur des nuits ; les valeurs se situant :

- pour Bourges, dans un intervalle de 7,8 °C (1972) à 14,2 °C en 2006
- pour Tours, dans un intervalle de 8,7 °C (1986) à 14,2 °C en 2006

Indicateurs 2 : Classes des indices de fraîcheur des nuits

Séries de 1959 à 2017 sur la station :

- 18 : Bourges

Calcul de l'indicateur

Classement des indices de fraîcheur des nuits selon les classes climatiques (défini par Tonietto et Carbonneau, 2004) pour différentes moyennes trentennaires (1961-1990 ; 1971-2000 ; 1981-2010)

L'indice de fraîcheur des nuits est classé en 4 classes selon le tableau ci-dessous :

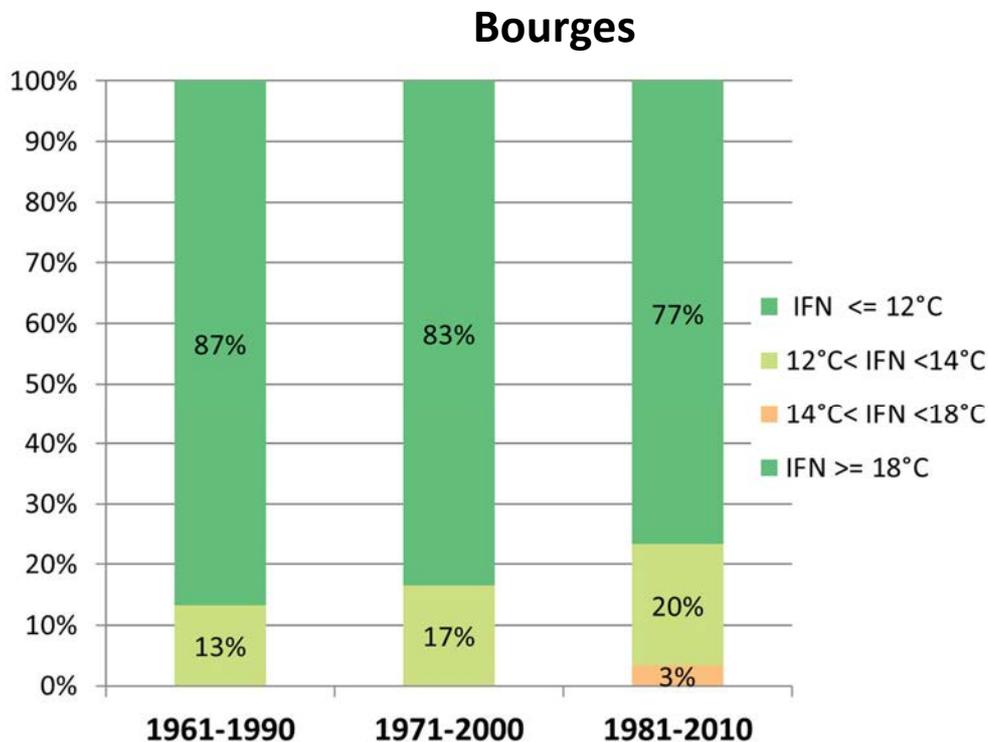
Caractéristiques	Rangs	Valeurs	Exemples : Villes (Pays)
Nuits chaudes	1	$x > 18^{\circ}\text{C}$	Marsala (I), Nabeul (T)
Nuits tempérées	2	$14^{\circ}\text{C} \leq x \leq 18^{\circ}\text{C}$	Madrid (E), Montpellier (F)
Nuits fraîches	3	$12^{\circ}\text{C} \leq x \leq 14^{\circ}\text{C}$	Porto (P), Carcassonne (F)
Nuits très fraîches	4	$x \leq 12^{\circ}\text{C}$	Freiburg (A), Napa (USA)

Évolution observée

- En abscisse : Classes des indices de fraîcheur des nuits
- En ordonnée : Pourcentage



B5-Indice de fraîcheur des nuits du 1^{er} au 30 septembre



Concernant la station de Bourges, les « nuits très fraîches » (moyenne des températures minimales journalières de septembre $\leq 12^{\circ}\text{C}$) ont peu évolué car elles sont passées de 9 années sur 10 en « 1975 » à 8 années sur 10 en « 1995 ».

Analyse

On ne constate aucune évolution de l'indice de fraîcheur des nuits, ni en tendance ni en variabilité, les valeurs se situant dans un intervalle compris entre :

- $7,8^{\circ}\text{C}$ (année 1972) et $14,2^{\circ}\text{C}$ (année 2006) pour la station de Bourges
- $8,7^{\circ}\text{C}$ (année 1986) et $14,2^{\circ}\text{C}$ (année 2006) pour la station de Tours

Ce constat est le même à Cognac, avec un indice étudié depuis 1953 (Levrault et al, 2015).

Ce résultat est un peu surprenant, compte-tenu de l'évolution significative d'autres indicateurs thermiques (voir cumul saisonnier d'ETP en automne en Région Centre Val de Loire)

Il pourra être confirmé par l'analyse des températures moyennes de septembre, ou par l'analyse de l'IFN dans d'autres sites de la région.

Si ce résultat se confirme, cela signifie que l'augmentation de la température à cette période de l'année, résulte de l'augmentation des températures diurnes, et non pas nocturnes.



B5-Indice de fraîcheur des nuits du 1er au 30 septembre

Parallèlement, il faut savoir qu'en raison de l'augmentation tendancielle des températures au cours des dernières décennies, les cycles végétatifs de la vigne ont avancé (par exemple, date de vendange avancée de 3 jours par décennie depuis une cinquantaine d'année). Si le calcul de l'IFN est réalisé sur les 30 jours précédant la maturité et non plus à date fixe (30 jours de septembre), les évolutions tendanciennes de l'IFN seront sûrement plus marquées. L'absence de tendance, constatée ici, ne signifie donc pas que les conditions de maturation des raisins sont inchangées.

L'évolution de l'IFN peut avoir des conséquences importantes dans le domaine de l'œnologie. Pour ne prendre qu'un exemple, les thiols (composés soufrés) souvent recherchés dans le profil aromatique des vins vont avoir tendance à se développer en période de nuits fraîches pendant la maturation des raisins.



A retenir

On ne constate pas d'évolution de l'indice de fraîcheur des nuits, ni à la station de Bourges (1959 à 2017), ni à la station de Tours (1982 à 2017).

L'avancement phénologique observé sur la vigne peut cependant entraîner une évolution des conditions thermiques de maturation, même en l'absence d'évolution de cet indice calculé à dates fixes (septembre).



Pour en savoir plus

Carey VA, Saayman D, Archer E, Barbeau G, Wallace M (2008) Viticultural terroirs in Stellenbosch, South Africa. I. The identification of natural terroirs units. *J Int Sci Vigne Vin* 42(4):169-183

LEVRAULT et al, ORACLE Poitou Charentes, 2015, <https://deux-sevres.chambre-agriculture.fr>

Neethling. E. Adaptation de la viticulture au changement climatique : vers des stratégies à haute résolution. Géographie. Université Rennes 2, 2016. Français.

Tonietto J, Carbonneau A (2004) A multicriteria climatic classification system for grapegrowing regions worldwide. *Agr Forest Meteorol* 124: 81-97



B6-Faisabilité d'une culture intermédiaire

Nature et source des données

Séries quotidiennes fournies par Météo France

Indicateurs 1 : faisabilité d'une culture d'été

Séries de 1959 à 2017 sur la station :

- 18 : Bourges
- 28 : Chartres

Séries de 1982 à 2017 sur la station :

- 37 : Tours

La quantité de chaleur ("disponibilité thermique") disponible durant l'été, détermine la possibilité (ou non) de mettre en place après les récoltes des cultures d'automne de l'année n une culture dite dérobée. Or, le réchauffement climatique accroît tendanciellement la disponibilité thermique estivale. Pour apprécier l'accroissement de faisabilité de cette pratique agricole, on analyse au cours des décennies écoulées le cas d'une culture en dérobé, dans les conditions suivantes :

- semis derrière une orge d'hiver, un pois ou un ray gras le 20 juin ;
- besoins thermiques en base 0 pour que la culture parvienne à maturité ;
- récolte le 30 septembre au plus tard pour éviter les risques de gel et pouvoir implanter la culture d'automne de l'année n+1.

On cumule, à partir du 20 juin et jusqu'au 30 septembre les températures moyennes journalières positives, ce qui correspond au zéro de végétation de la majorité des cultures.

Calcul de l'indicateur

- Cumul des températures moyennes journalières à partir de la base de 0°C pour la période du 20 juin au 30 septembre (nuage de points bleus).
- Tendence linéaire sur la période 1959 – 2017 (courbe noire)
- Moyenne trentenaire (courbe verte : 1961-1990 ; courbe orange : 1971-2000 ; courbe rouge : 1981-2010)

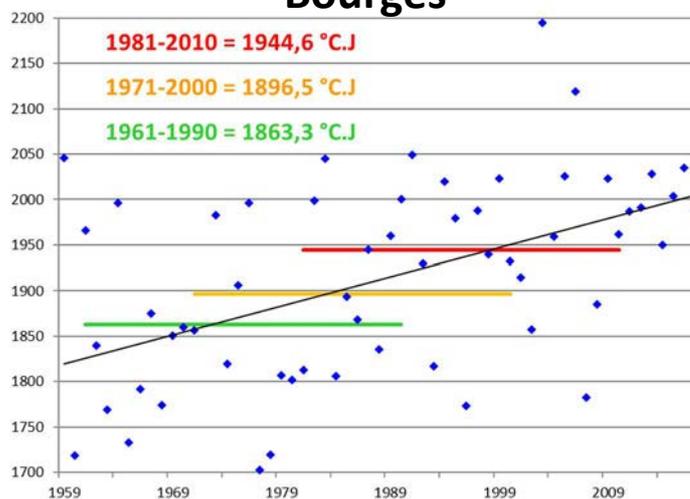
Évolution observée

- En abscisse : Années
- En ordonnée : somme de température base 0°C

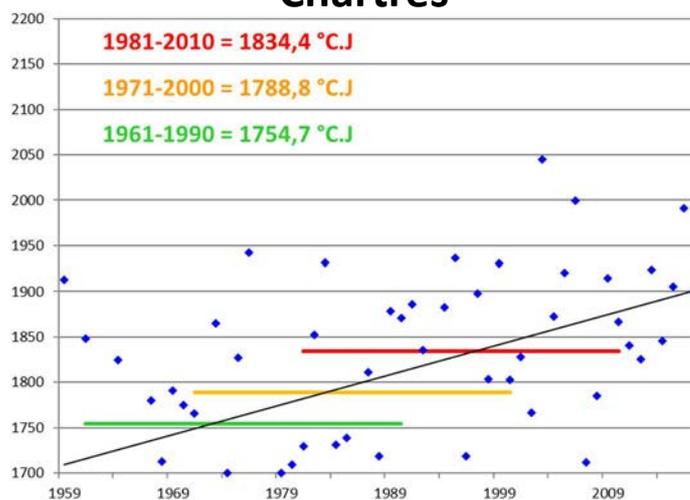


B6-Faisabilité d'une culture intermédiaire

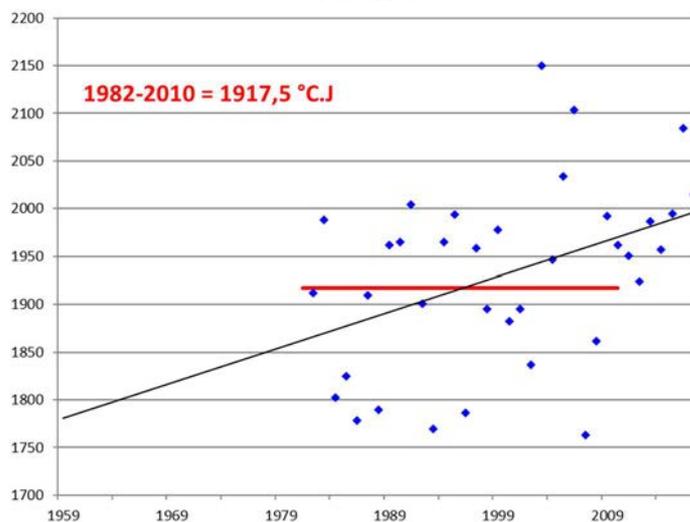
Bourges



Chartres



Tours





B6-Faisabilité d'une culture intermédiaire

Analyse

Dép.	Stations	1ère année disponible	Nb d'années analysées	évolution /10 ans	évolution /30 ans	Test	"Force" de la tendance	R ²
18	Bourges	1959	59	31,9	95,6	7,8E-05	très hautement significative	0,24
28	Chartres	1959	59	33,0	99,1	1,9E-05	très hautement significative	0,28
37	Tours	1982	36	37,1	111,2	1,3E-02	significative	0,17

- L'évolution de la somme de température base 0°C du 20 juin au 30 septembre depuis 1959 (1982 pour la station de Tours) montre que les tendances (ajustement linéaire) observées sur l'ensemble de la période sont de :

- + 31,9 °C.j par décennie à Bourges, soit + 188 °C.J en 59 ans
- + 33 °C.j par décennie à Chartres, soit + 195 °C.J en 59 ans
- + 37,1 °C.j par décennie à Tours, soit + 111 °C.J en 30 ans

- Cet indicateur est variable d'une année à l'autre (variabilité inter-annuelle) car R² moyen = 0,23.

- Ces évolutions se retrouvent dans la moyenne des régions voisines. Par exemple :
+ 33 °C.j par décennie à Saintes depuis 1960 (Levrault et al., 2015)

Indicateurs 2 : faisabilité d'une culture intermédiaire d'hiver

Séries de 1959 à 2017 sur la station :

- 18 : Bourges
- 28 : Chartres

Séries de 1983 à 2017 sur la station :

- 37 : Tours

Calcul de l'indicateur

- Cumul des températures moyennes journalières à partir de la base de 0°C pour la période du 15 octobre au 1er mai (nuage de points bleus).
- Tendence linéaire sur la période 1959 – 2017 (courbe noire)
- Moyenne trentenaire (courbe verte : 1961-1990 ; courbe orange : 1971-2000 ; courbe rouge : 1981-2010)

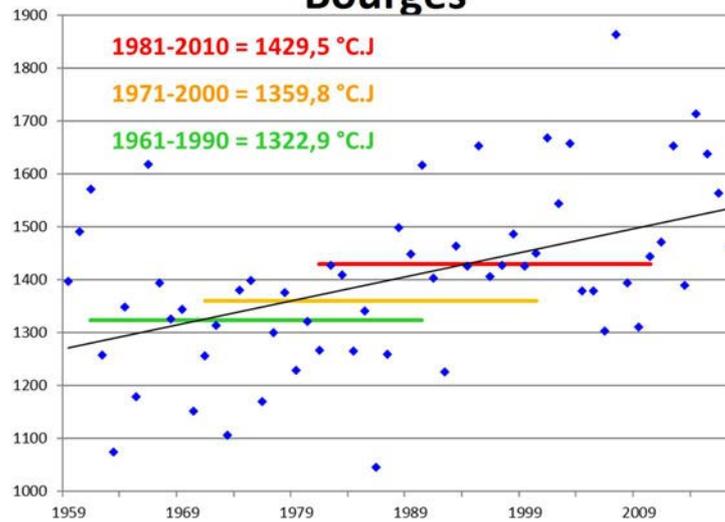
Évolution observée

- En abscisse : Années
- En ordonnée : somme de température base 0°C

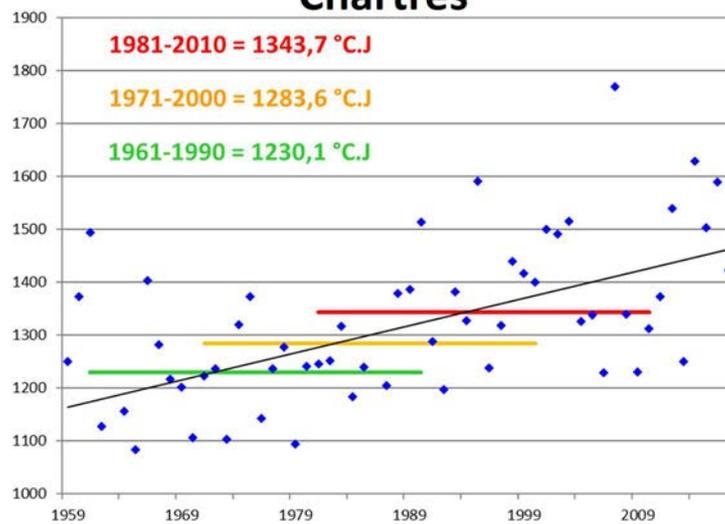


B6-Faisabilité d'une culture intermédiaire

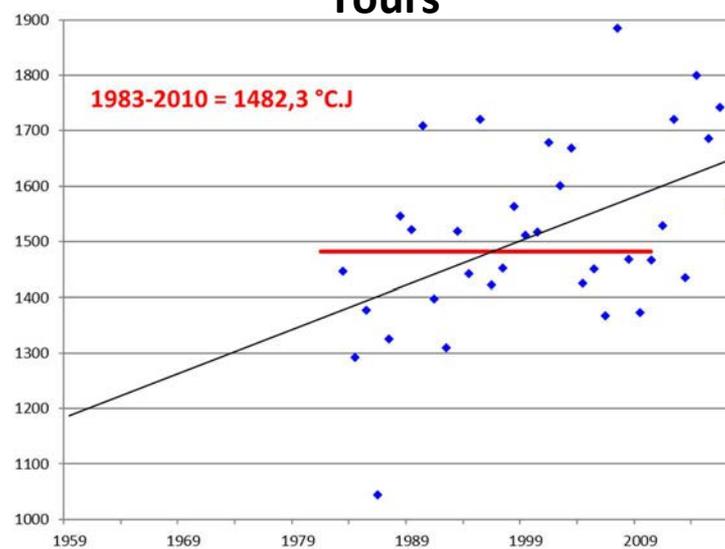
Bourges



Chartres



Tours





B6-Faisabilité d'une culture intermédiaire

Analyse

Dép.	Stations	1ère année disponible	Nb d'années analysées	évolution /10 ans	évolution /30 ans	Test	"Force" de la tendance	R ²
18	Bourges	1959	59	45,5	136,4	1,3E-04	très hautement significative	0,23
28	Chartres	1959	59	51,3	153,9	7,5E-06	très hautement significative	0,30
37	Tours	1983	35	79,6	238,7	3,0E-03	hautement significative	0,24

L'évolution de la somme de température base 0°C du 15 octobre au 1er mai depuis 1959 (1983 pour la station de Tours) montre que les tendances (ajustement linéaire) observées sur l'ensemble de la période sont de :

- + 45,5 °C.j par décennie à Bourges, soit + 268 °C.J en 59 ans
- + 51,3 °C.j par décennie à Chartres, soit + 303 °C.J en 59 ans
- + 79,6 °C.j par décennie à Tours, soit + 239 °C.J en 30 ans

- Cet indicateur est variable d'une année à l'autre (variabilité inter-annuelle) car R² moyen = 0,25.

- Ces évolutions se retrouvent dans la moyenne des régions voisines. Par exemple :

- + 69 °C.j par décennie d'octobre à mai (P<0,01) au Mans depuis 1971 et
- + 54 °C.j par décennie d'octobre à mai (P<0,05) à Angers depuis 1971 (Colombie et al., 2017)

Concernant la culture intermédiaire d'été :

Malgré une variabilité interannuelle conséquente, on observe sur la période étudiée une augmentation tendancielle de la disponibilité thermique estivale très significative de l'ordre de + 34 °C.j par décennie. Cette forte variabilité souligne la nécessité pour le conseil agricole, de disposer de références fiables et exprimées statistiquement (appréciation d'un risque).

Actuellement, ces dates de semis ne sont pas toujours praticables, du fait des dates de récolte des précédents envisagés (orges, pois, ray gras). Mais, elles devraient le devenir en raison de l'avancement tendanciel des dates de récolte des cultures d'hiver.

Les résultats présentés ici ne concernent que la dimension thermique d'une culture en dérobé. La dimension hydrique est elle aussi très importante, en particulier, au moment de la levée en lien avec l'humidité du sol, ceci à une période généralement peu pourvue en précipitations. Un complément d'analyse sur le plan hydrique est nécessaire pour un regard plus complet sur la faisabilité future d'une culture en dérobé.

Concernant la culture intermédiaire d'hiver :

Cette période de temps (d'octobre à mai) peut correspondre à la période de semis-floraison pour une culture blé classique. Dans ce cas, les tendances à la hausse des degrés-jours de croissance du blé sont à mettre en relation avec l'augmentation des températures annuelles et saisonnières (voir « Température moyenne annuelle » et « Déficit hydrique climatique saisonnier »). Cette augmentation conduit à un raccourcissement de la durée des stades phénologiques. Par contre, ce raccourcissement est limité par les besoins du blé en vernalisation (jours où la température ne dépasse pas 10°C) pour fleurir (Brisson et al., 2010). D'ailleurs, les variétés de blé de printemps voient une anticipation plus importante de leurs stades phénologiques que celles d'hiver du fait de l'absence de leur besoin en froid (Soussana, 2013).



B6-Faisabilité d'une culture intermédiaire

Mais cette période de temps (d'octobre à mai) peut correspondre également à une culture intermédiaire qui serait implantée avant une culture de printemps. En règle générale, les agriculteurs ont l'obligation de réaliser une culture intermédiaire piège à nitrates (CIPAN) dans ce cas-là mais sans véritable objectif de rendement. L'élévation des températures attendue pour le XXIème siècle entraînera une anticipation encore plus importante des stades phénologiques. Ainsi, cette CIPAN pourrait se transformer en véritable CIVE (Culture Intermédiaire à Valorisation Energétique) récolté fin avril sans désorganiser l'assolement initial prévu en culture de printemps. Cette culture intermédiaire aurait alors un véritable objectif de biomasse, permettant de réaliser 3 cultures en 2 ans. A noter que de nombreux éleveurs usent déjà de cette pratique, appelé dérobée, mais à terme cette pratique pourrait se généraliser notamment pour faire de la biomasse énergétique.



A retenir

Concernant les cultures intermédiaires d'été, la disponibilité thermique estivale a augmenté tendanciellement au cours de la période d'observation, rendant de plus en plus envisageable des cultures en dérobé, pour une date de semis située le 20 juin (après la moisson).

Concernant les sommes de températures hivernales (du 15 octobre au 1^{er} mai), même si la vernalisation (besoin en froid l'hiver) des cultures est difficile à caractériser, il est à supposer de ces résultats un avancement dans les stades phénologiques du blé. Cette période pourrait être valorisée par une 3^{ème} culture (positionnée avant une culture de printemps) en 2 ans. L'élévation des sommes de température permettra d'obtenir de plus en plus de biomasse de cette culture (ensilage en fin avril).

La réflexion présentée ici, ne porte que sur le volet thermique d'une culture en dérobé. Sans l'ignorer, elle ne traite pas de la question hydrique, tout aussi capitale pour la viabilité économique de la culture étudiée ici.



Pour en savoir plus

BRISSON N., LEVRAULT F. ; 2010. Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces. Le Livre Vert du projet CLIMATOR (2007-2010). ADEME.

COLOMBIE et al, ORACLE Pays de la Loire, 2017, <https://pays-de-la-loire.chambres-agriculture.fr>

LEVRAULT et al, ORACLE Poitou Charentes, 2015, <https://deux-sevres.chambre-agriculture.fr>

SOUSSANA J.F. (coord) ; 2013, S'adapter au changement climatique. Agriculture, écosystèmes et territoires. Editions Quae. Versailles.



B7-Date de reprise de végétation de la prairie et mise à l'herbe

Nature et source des données

Séries quotidiennes fournies par Météo France

Indicateurs 1 : Date de reprise de végétation de la prairie

Séries de 1959 à 2017 sur la station :

- 18 : Bourges

Séries de 1982 à 2017 sur la station :

- 37 : Tours

Calcul de l'indicateur

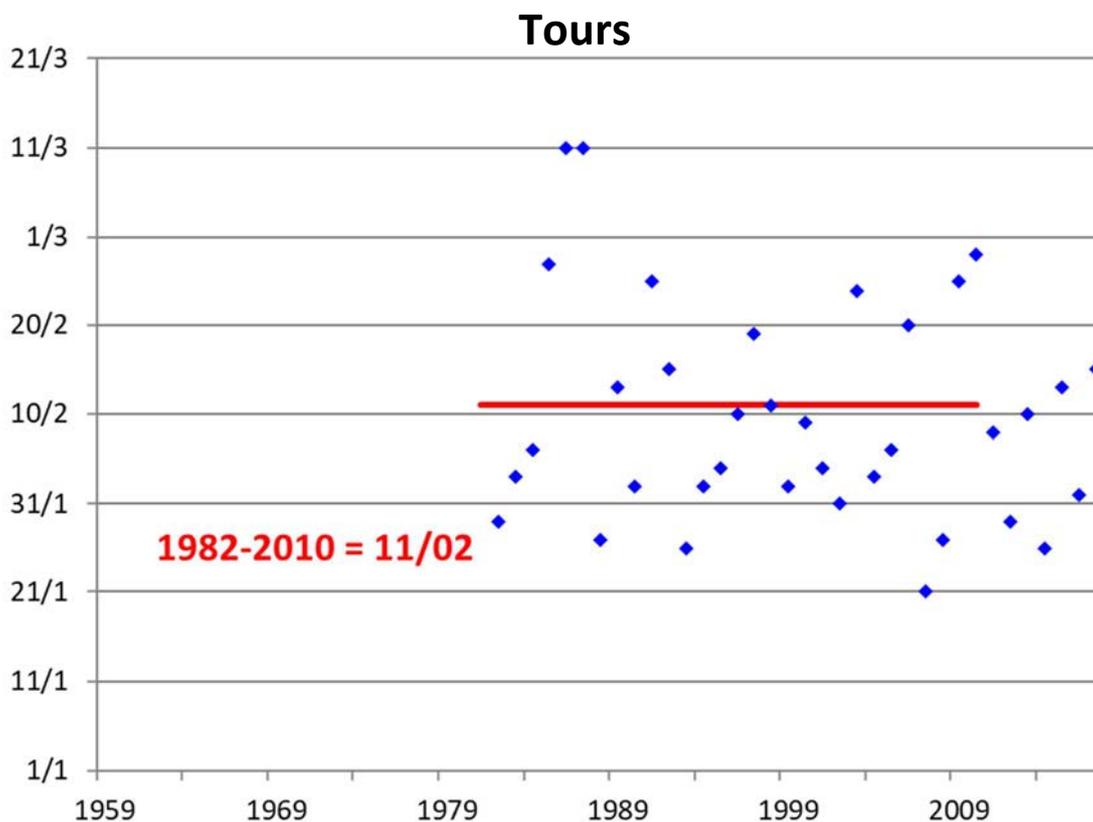
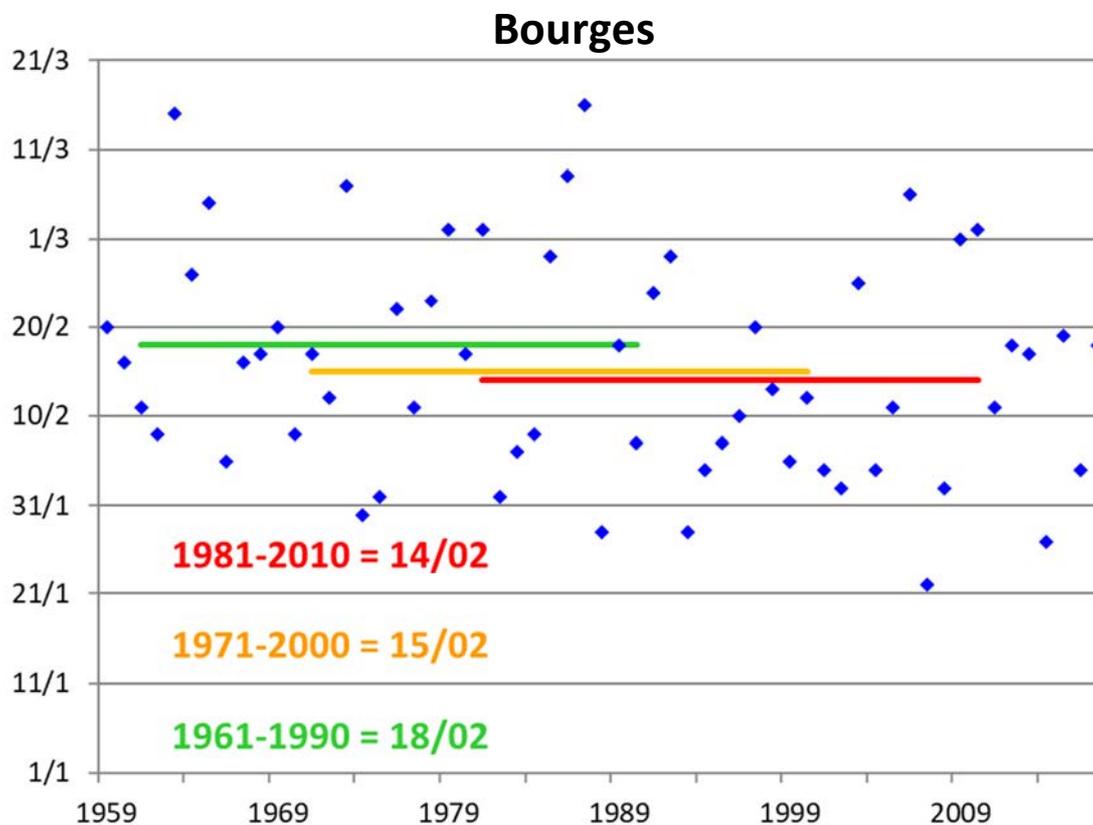
- Evolution des dates de franchissement de la somme de température base 0°C de 200°CJ, à compter du 1er janvier (nuage de points bleus).
- Tendence linéaire sur la période 1959 – 2017 (courbe noire)
- Moyenne trentenaire (courbe verte : 1961-1990 ; courbe orange : 1971-2000 ; courbe rouge : 1981-2010)

Évolution observée

- En abscisse : Années
- En ordonnée : Date



B7-Date de reprise de végétation de la prairie et mise à l'herbe





B7-Date de reprise de végétation de la prairie et mise à l'herbe

Analyse

Dép.	Stations	1ère année disponible	Nb d'années analysées	penne	évolution /10 ans	évolution /30 ans	Test	"Force" de la tendance	R ²
18	Bourges	1959	59	-0,136	-1,4	-4,1	0,15	non significative	0,04
37	Tours	1982	36	-0,191	-1,9	-5,7	0,34	non significative	0,03

L'évolution de la date de reprise de végétation de la prairie depuis 1959 (1982 pour la station de Tours) montre que les tendances (ajustement linéaire) observées sur l'ensemble de la période ne sont pas significatives :

- 1,4 j par décennie à Bourges (NS)
- 1,9 j par décennie à Tours (NS)

- Cet indicateur est extrêmement variable d'une année à l'autre (variabilité inter-annuelle) car R² moyen = 0,04.

- Ces évolutions se retrouvent dans la moyenne des régions voisines. Par exemple :
 - 1 j par décennie à Lezay depuis 1959 (Levrault et al, 2015)

Date de reprise de végétation (200°CJ base 0°C initialisé au 1er janvier)

La variabilité inter annuelle est très marquée avec des valeurs comprises :

- entre le 22 janvier et 15 mars pour la station de Bourges et
- entre le 21 janvier et 10 mars pour la station de Tours

La date moyenne de reprise de végétation des 2 stations est le 15 février, sur l'ensemble de la période. La tendance de -1,6 j par décennie n'étant pas significative, l'avancement de la date de reprise de végétation semble donc pour l'instant très modéré, ce qui peut s'expliquer par :

- le mode de calcul de l'indicateur qui gomme toute différence entre les températures, dès-lors qu'elles sont inférieures à 0°C (la raréfaction des températures très basses n'impacte pas l'indicateur) ;
- le fait que le réchauffement observé ne porte pas principalement sur cette période de l'année.



B7-Date de reprise de végétation de la prairie et mise à l'herbe

Indicateurs 2 : Date de mise à l'herbe

Séries de 1959 à 2017 sur la station :

- 18 : Bourges

Séries de 1982 à 2017 sur la station :

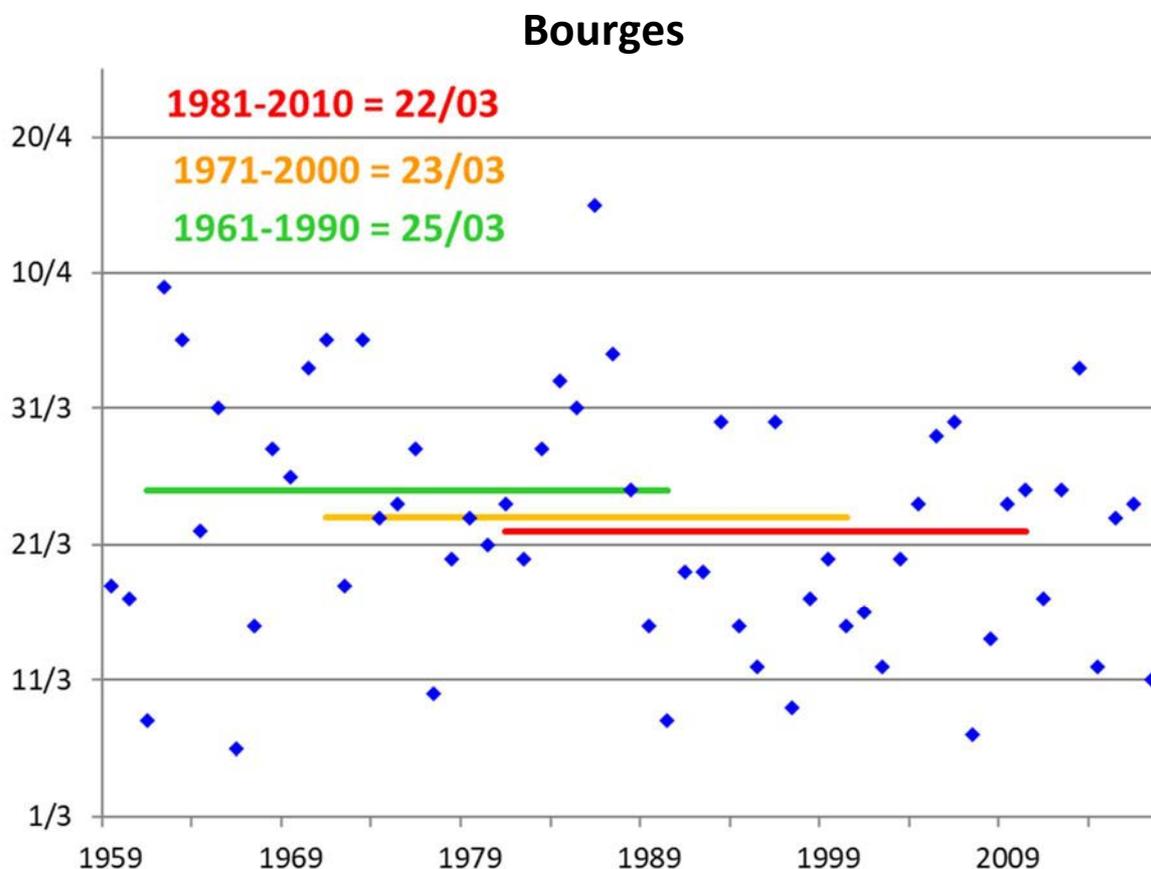
- 37 : Tours

Calcul de l'indicateur

- Evolution des dates de franchissement de la somme de température base 0°C de 300°CJ, à compter du 1er février (nuage de points bleus).
- Tendence linéaire sur la période 1959 – 2017 (courbe noire)
- Moyenne trentenaire (courbe verte : 1961-1990 ; courbe orange : 1971-2000 ; courbe rouge : 1981-2010)

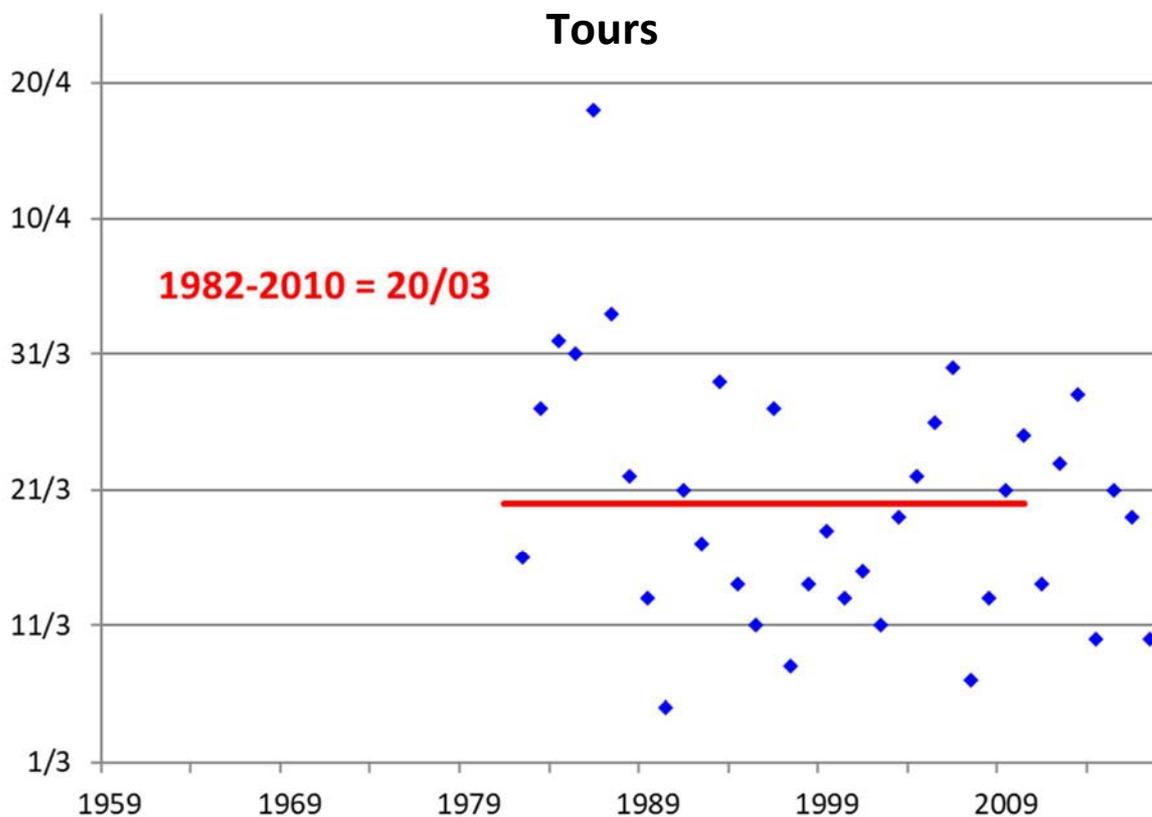
Évolution observée

- En abscisse : Années
- En ordonnée : Date





B7-Date de reprise de végétation de la prairie et mise à l'herbe



Analyse

Dép.	Stations	1ère année disponible	Nb d'années analysées	évolution /10 ans	évolution /30 ans	Test	"Force" de la tendance	R ²
18	Bourges	1959	59	-1,0	-2,9	0,15	non significative	0,04
37	Tours	1982	36	-2,5	-7,6	0,08	non significative	0,09

L'évolution de la date de mise à l'herbe depuis 1959 (1982 pour la station de Tours) montre que les tendances (ajustement linéaire) observées sur l'ensemble de la période ne sont pas significatives :

- 1,4 j par décennie à Bourges (NS)
- 2,5 j par décennie à Tours (NS)

A noter que concernant la station de Tours, la tendance est presque significative (P=0,08), ce qui fait environ une mise à l'herbe avancée de 15 jours en 60 ans.

- Cet indicateur est extrêmement variable d'une année à l'autre (variabilité inter-annuelle) car R² moyen = 0,06.

- Ces évolutions se retrouvent dans la moyenne des régions voisines. Par exemple, à Lezay dans le 79 où la tendance est de - 0,7 j par décennie mais non significative.



B7-Date de reprise de végétation de la prairie et mise à l'herbe

Date de mise à l'herbe (300°CJ base 0°C initialisé au 1er février)

Comme pour la reprise de la végétation, la variabilité inter annuelle est très marquée avec des valeurs comprises :

- entre le 5 mars et le 14 avril pour la station de Bourges et
- entre le 4 mars et 17 avril pour la station de Tours.

La tendance à l'avancement de la date de mise à l'herbe, est semblable à l'indicateur précédent avec - 1,7 jours par décennie, mais non significative. La date moyenne de mise à l'herbe est le 24 mars sur l'ensemble de la période.

Les mêmes causes que précédemment peuvent être avancées pour expliquer l'avancement modéré de la date de mise à l'herbe. Une comparaison à d'autres stations permettrait de conforter ce résultat.

Cet avancement modeste de la date de mise à l'herbe (avancée d'1 à 2 jours par décennie) apparaît donc comme un levier limité d'adaptation (esquive) vis-à-vis des stress hydriques estivaux. C'est davantage l'accroissement de productivité lié à la hausse des températures printanières qui semble constituer une parade aux baisses attendues de productivité estivale des fourrages non irrigués.



A retenir

Sur la période d'étude (1959-2017 pour Bourges et 1982-2017 pour Tours), la date de reprise de végétation et la date de mise à l'herbe avancent de respectivement - 1,6 et -1,7 jour par décennie (moyenne des 2 sites). Le mode de calcul des indicateurs et la période sur laquelle il porte expliquent probablement cette variation tendancielle modeste.

Sous réserve de confirmation dans d'autres sites de la région, ce critère pris isolément n'apparaît pas être un levier majeur d'esquive de la contrainte hydrique estivale.



Pour en savoir plus

LEVRAULT et al, ORACLE Poitou Charentes, 2015, <https://deux-sevres.chambre-agriculture.fr>



B8-Episodes pluvieux intenses

Nature et source des données

Séries quotidiennes fournies par Météo France

Indicateurs 1

Séries de 1959 à 2017 sur la station :

- 18 : Bourges
- 28 : Chartres

Séries de 1965 à 2017 sur la station :

- 37 : Tours

Calcul de l'indicateur

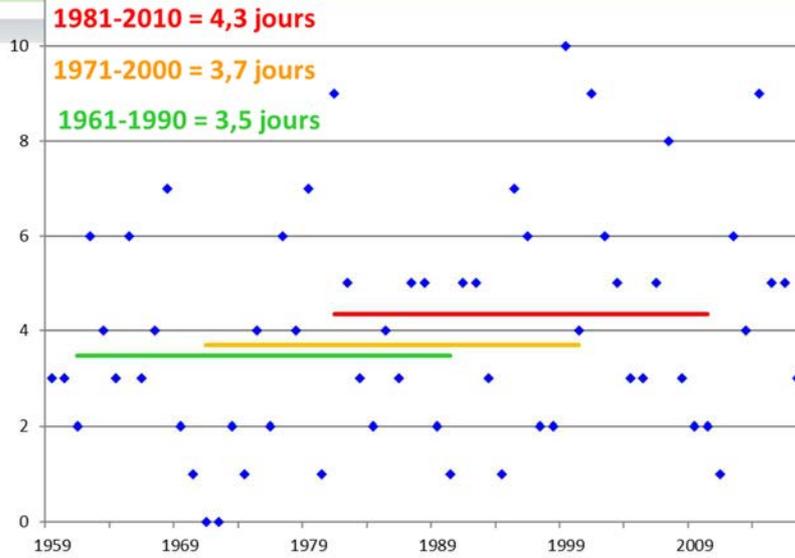
- Nombre de jours par an où le cumul journalier des précipitations dépasse 20 mm (nuage de points bleus)
- Tendence linéaire sur la période 1959 – 2017 (courbe noire)
- Moyenne trentenaire (courbe verte : 1961-1990 ; courbe orange : 1971-2000 ; courbe rouge : 1981-2010)

Évolution observée

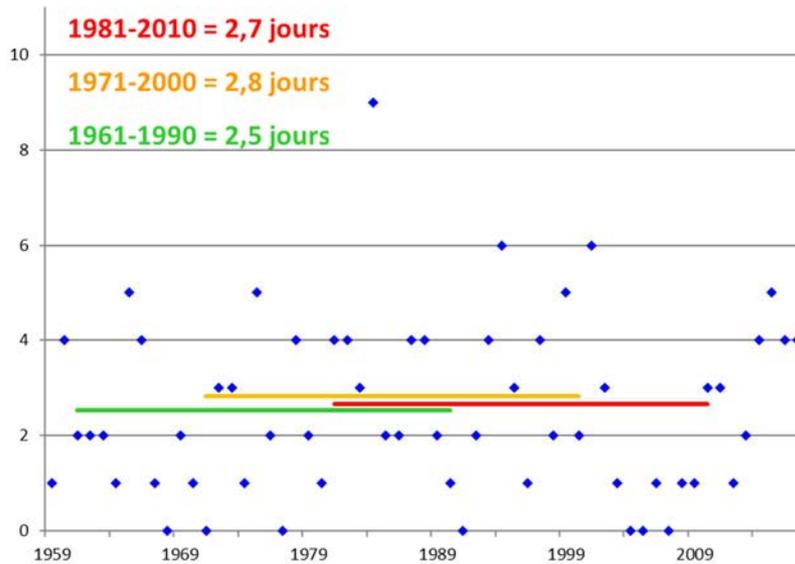
- En abscisse : Années
- En ordonnée : Nombre de jours



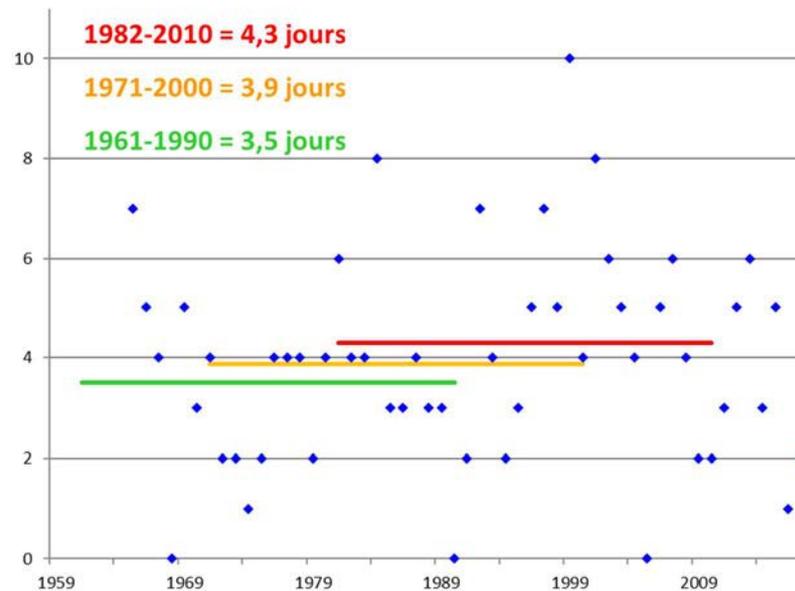
angement cLimatiquE



Chartres



Tours





B8-Episodes pluvieux intenses



Dép.	Stations	1ère année disponible	Nb d'années analysées	évolution /10 ans	évolution /30 ans	Test	"Force" de la tendance	R ²
18	Bourges	1959	59	0,3	0,9	0,10	non significative	0,05
28	Chartres	1959	59	0,1	0,2	0,62	non significative	0,00
37	Tours	1965	53	0,1	0,3	0,61	non significative	0,01

L'évolution du nombre de jours de pluies intenses (cumuls journaliers supérieurs à 20 mm) depuis 1959 (1965 pour la station de Tours) montre que les tendances (ajustement linéaire) observées sur l'ensemble de la période ne sont pas significatives :

- + 0,3 j par décennie à Bourges,
- + 0,1 j par décennie à Chartres,
- + 0,1 j par décennie à Tours.

- Cet indicateur est extrêmement variable d'une année à l'autre (variabilité interannuelle) car R² moyen = 0,02.

- Cette absence d'évolution se retrouve dans les régions voisines. Par exemple, à Lezay (79) depuis 1932 (Levrault et al, 2015)

Les précipitations intenses peuvent être préjudiciables à la production agricole, que ce soit par leur effet direct sur certaines cultures (verse des plantes annuelles) ou au travers de l'érosion lorsque la topographie (terrains en pente) et l'état de surface du sol s'y prêtent. Dans le contexte du changement climatique qui accélère le cycle de l'eau à l'échelle globale, on peut légitimement s'interroger sur l'augmentation – ou non – des épisodes pluvieux intenses.

Il n'existe pas de seuil établi, à partir duquel on peut décréter que les précipitations sont préjudiciables. Le seuil choisi de 20 mm de cumul journalier correspond à des valeurs peu fréquentes voire rares pour notre région (3,5 jours par an en moyenne).

Sur l'ensemble des 59 années d'observation (53 pour Tours), on ne constate pas d'évolution significative de cet indicateur. Les cumuls journaliers supérieurs à 20 mm oscillent entre 0 et 10 jours maximum par an, sans évolution perceptible en tendance ou en variabilité.



B8-Episodes pluvieux intenses



A retenir

Pour les stations de Bourges, Chartres et Tours, on ne constate aucune évolution du nombre de jours où les pluies journalières dépassent 20 mm, ni en tendance, ni en variabilité.

D'autres événements météorologiques violents (vents forts, grêle, durée de la pluie) préjudiciables à la production agricole, devront être analysés à l'avenir.



Pour aller plus loin

L'intensité exacte de ces précipitations journalières n'est pas connue : par exemple, un cumul journalier de 30 mm pourra être tombé en moins d'une heure, ou bien en trois séquences de 10 mm séparées de plusieurs heures. La répartition entre saisons n'est pas non plus analysée ici.



Pour en savoir plus

LEVRAULT et al, ORACLE Poitou Charentes, 2015, <https://deux-sevres.chambre-agriculture.fr>



C1-Rendement en blé tendre

🔑 Nature et source des données

Données fournies par la DRAAF

🕒 Indicateur 1

Evolution des rendements régionaux en blé tendre de 1929 à 2017. Données manquantes : années 1942, 1947, 1949.

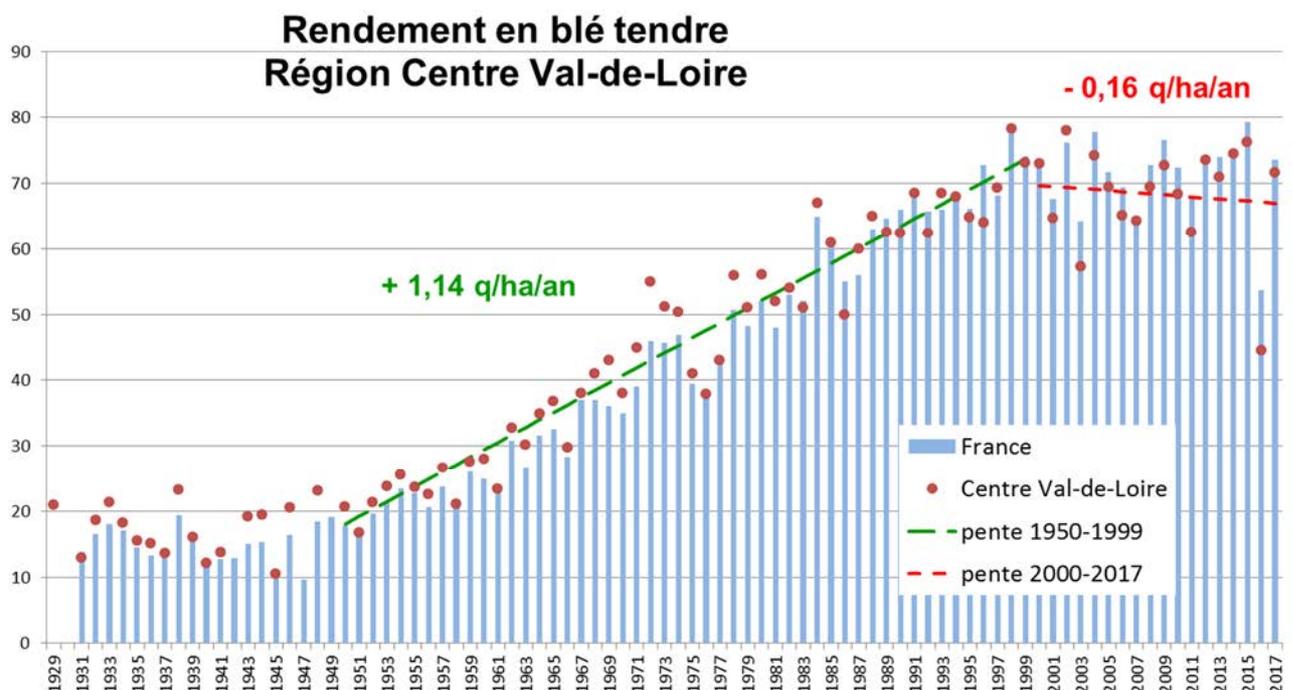
📊 Calcul de l'indicateur 1

- Evolution des rendements en France (diagramme en bâtons bleu clair)
- Evolution des rendements en région Centre Val-de-Loire (nuage de points rouge)
- Tendence linéaire en région Centre Val-de-Loire sur la période 1950 – 1999 (tiret large vert)
- Tendence linéaire en région Centre Val-de-Loire sur la période 2000 – 2017 (tiret court rouge)

📈 Évolution observée

Occupant près de 4,8 millions d'hectares (17 % de la SAU), le blé tendre arrive au premier rang des grandes cultures françaises. Le rendement moyen français est de 70 q/ha (moyenne 1989-2017). Un quintal (q) = 100 kg.

- En abscisse : Années
- En ordonnée : rendement en quintaux (q)





C1-Rendement en blé tendre

Analyse

L'évolution des rendements en blé tendre observé en région Centre Val-de-Loire depuis 1950 montre que :

- La tendance linéaire observée sur l'ensemble de la période 1950 – 2017 est en augmentation très significative (+ 0,83 q/ha/an) mais on observe une rupture de pente vers les années 2000 avec :

+ 1,14 q/ha/an entre 1950 et 1999 ($P = 2.10^{-26}$)

- 0,16 q/ha/an entre 2000 et 2017 (NS)

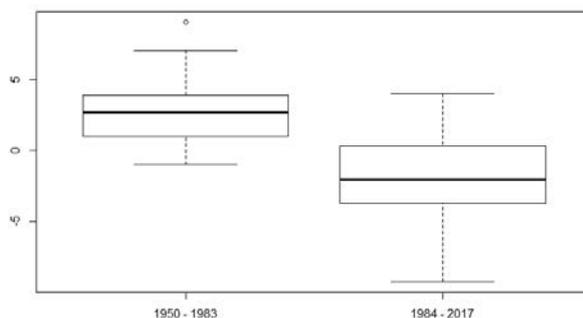
- Idem pour la tendance au niveau national :

+ 1,22 q/ha/an entre 1950 et 1999 ($P = 9.10^{-37}$)

- 0,04 q/ha/an entre 2000 et 2017 (NS)

- Ces évolutions se retrouvent dans la moyenne des régions voisines. Par exemple :
 - En Poitou-Charentes, **+1,08 q/ha/an** de 1961 à 1998 et **-0,15 q/ha/an** de 1999 à 2015 (Levrault et al, 2015),
 - En Pays de la Loire, **+1,15 q/ha/an** de 1960 à 1996 et **+0,23 q/ha/an** de 1997 à 2015 (Colombie et al, 2017).
- De 1950 à 2017, le rendement moyen français (51,45 q/ha) est le même que celui de la région Centre Val-de-Loire (51,8 q/ha) mais cela cache une évolution de ces 2 rendements. Sur le graphique ci-dessus, on observe visuellement qu'avant les années 1980 les points rouges (moyennes régionales) sont au-dessus des diagrammes bleus (moyennes françaises) et inversement après 1984. En effet, on note :
 - **+ 2,65 q** de 1950 à 1983 entre le rendement moyen français (34,1 q/ha) et régional (36,7 q/ha)
 - **- 1,88 q** de 1984 à 2017 entre le rendement moyen français (68,8 q/ha) et régional (66,9 q/ha)

Cette différence est nettement significative selon le test de Student ($P < 0,05$) ce qui démontre qu'en moyenne le rendement régional est passé sous le rendement national à partir des années 1980.



Différence de rendement entre la moyenne nationale et régionale, au cours de la seconde moitié du XXème siècle (source : RStudio, test Student, $P = 2.10^{-9}$)



C1-Rendement en blé tendre



Indicateur 2

Evolution des rendements départementaux en blé tendre de 1929 à 2017. Données manquantes : années 1942, 1947, 1949.



Calcul de l'indicateur 2

- Evolution des rendements départementaux (nuage de points bleus)
- Tendence linéaire en département sur la période 1950 – 1999 (tiret large vert)
- Tendence linéaire en département sur la période 2000 – 2017 (tiret court rouge)
- Rendement maximum (point violet)



Évolution observée

- En abscisse : Années
- En ordonnée : rendement en quintaux (q)

Les rendements records en blé tendre ont eu lieu en 1998 (départements 18, 28, 41 et 45) ou en 2002 (départements 36 et 37). Ces années marquent une cassure nette de l'évolution du rendement en blé tendre. Tous les départements observaient une augmentation de plus de 1 quintal par hectare et par an de 1950 aux années 2000 (voire 1,22 q/ha/an pour l'Eure-et-Loir).

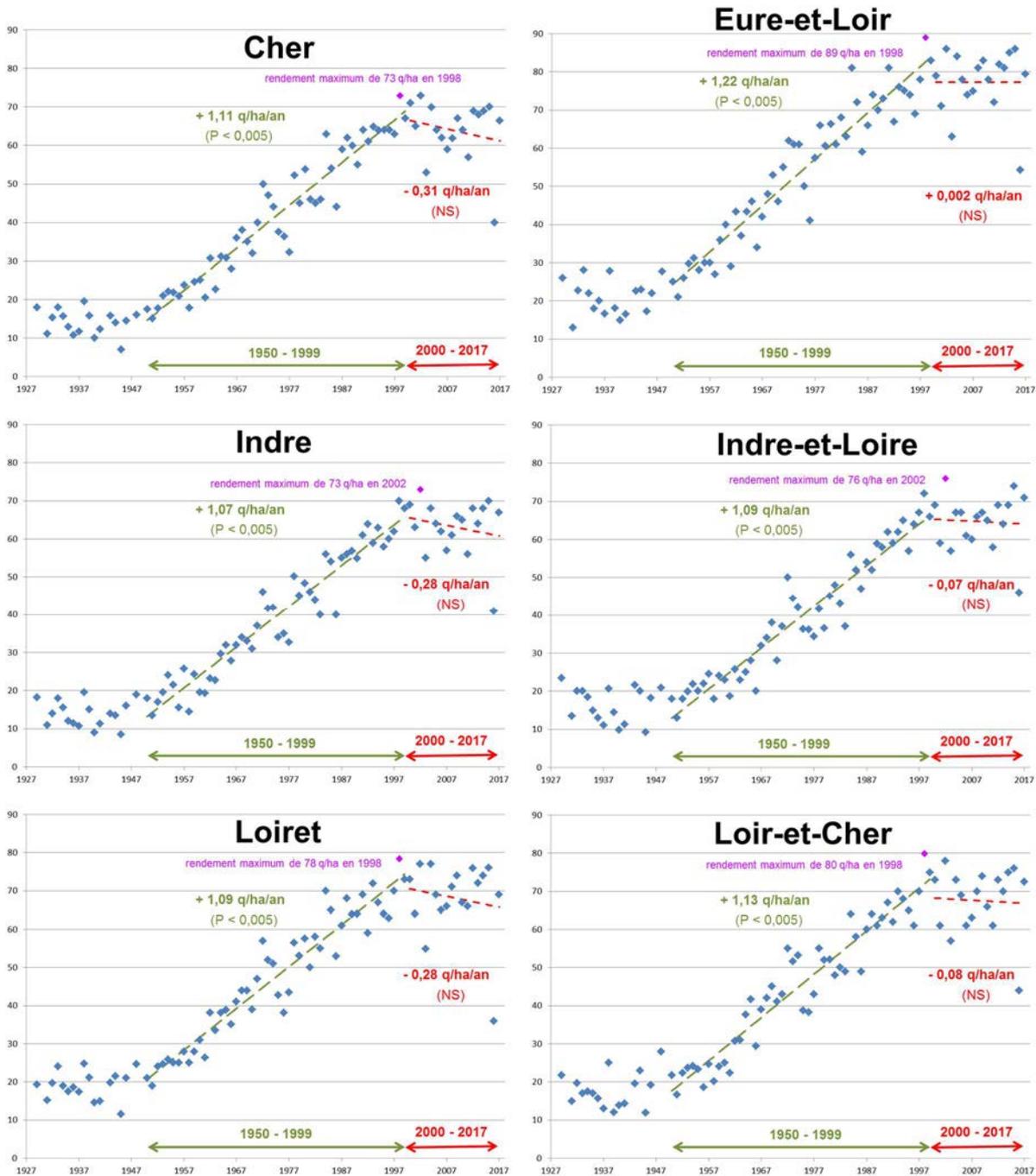
Depuis les années 2000, ces rendements ont diminué (pour les départements 18, 36 et 45) ou se sont stabilisés (pour les départements 28, 37 et 41) même si ces dernières tendances ne sont pas significatives.

3 IMPACTS AGRICOLES



Observatoire Régional sur l'Agriculture et le Changement cLimatiqueE

C1-Rendement en blé tendre





C1-Rendement en blé tendre



On observe que depuis les années 1950 et jusqu'à la fin des années 1990, les rendements départementaux et régionaux en blé tendre ont augmenté de façon nette et régulière (+1,14 q/ha/an en Région Centre Val-de-Loire), ce qui a permis de passer d'environ 17 q/ha (moyenne 1931-1949) à plus de 66 q/ha (moyenne 1986-2003). Cet accroissement spectaculaire s'explique par l'amélioration variétale, combinée à l'accroissement de la technicité de culture (préparation de sol, semis, engrais, protection phytosanitaire, récolte).

A la fin des années 1990, on constate une interruption assez brutale de cette progression, suivie par un net plafonnement des rendements. Le même phénomène s'observe également sur l'ensemble de la France (et même en Europe) avec quelques nuances, l'année de rupture se situant entre 1991 et 2000 suivant le département (Ray et al., 2012).

Les travaux de N. Brisson *et al* (2010) ont permis d'identifier les causes de ce plafonnement, et d'établir un lien avec le changement climatique.

- Tout d'abord, il est démontré que la progression annuelle des rendements en blé tendre résultant de l'amélioration variétale, s'est maintenue de façon continue (avant la rupture) en France à un niveau compris entre +1,0 à +1,2 q/ha/an. Le progrès génétique n'est donc pas en cause dans le plafonnement des rendements observés.
- Il est établi qu'une légère baisse (environ 20 kg N/ha) de la fertilisation azotée du blé tendre a eu lieu entre 2000 et 2007, consécutivement à la mise en application de la Directive Nitrates. La perte de rendement due au plafonnement de l'apport azoté, est faible (- 0,1 q/ha/an) car elle est en partie compensée par le fractionnement des apports de nitrates (3 apports au lieu de 2 permettent une meilleure efficacité) (Brisson & Levraut., 2010).
- En outre, il apparaît que les raccourcissements de rotations culturales et le remplacement des légumineuses par le colza ont entraîné une diminution de la surface en légumineuse (voir « surface en protéagineux »), qui s'est traduit par une baisse des rendements du blé tendre de - 0,35 q/ha/an.

La majorité de la perte de rendement peut être reprochée aux changements du climat (Brisson & Levraut, 2010). Deux facteurs climatiques sont à l'origine de cette stagnation de rendement : l'augmentation de l'échaudage et l'augmentation de la période de stress hydrique pendant l'élongation de la tige et le remplissage des grains (Gate et al., 2009). L'occurrence accrue de ces accidents physiologiques d'origine climatique a induit une limitation du rendement comprise entre -0,2 et -0,5 q/ha/an.

Les résultats climatiques, obtenus précédemment, ont montré une augmentation significative des journées estivales (+ 4,3 jours par décennie depuis 1959) et d'une augmentation des jours échaudants printaniers (+ 1,5 jours par décennie depuis 1959) (voir « Nombre de jours estivaux » et « Nombre de jours échaudants au printemps »). L'augmentation de l'ETP printanière (+7,3 mm par décennie) et estivale (+6,8 mm par décennie), l'augmentation du déficit hydrique estival (-6,8 mm par décennie) sont les prémices d'une tendance à l'accroissement des sécheresses printanières et estivales dans notre région (voir « Cumul saisonnier de l'ETP »).



C1–Rendement en blé tendre

Ainsi, le changement climatique (via le stress thermique et hydrique) a bien un impact dépréciateur sur les rendements en blé tendre en Centre Val-de-Loire. Cet impact, perceptible depuis les années 2000, se superpose à l'effet dépréciateur de deux autres facteurs (baisse de la fertilisation azotée et raréfaction des légumineuses dans les rotations) pour au final compenser en totalité les gains de rendement découlant du progrès génétique. Le changement climatique explique pour "un tiers à moitié" le plafonnement des rendements en blé tendre observé dans notre région depuis les années 2000.



A Retenir

On observe en région et dans chacun des départements un plafonnement des rendements en blé tendre qui commence au début des années 2000. Ce phénomène, qui s'observe dans l'ensemble des départements de France métropolitaine, résulte pour moitié du changement climatique qui a accru les stress hydriques et thermiques en fin de cycle cultural.



Pour aller plus loin

En matière d'adaptation au changement climatique, c'est donc l'esquive de ces accidents d'échaudage de fin de cycle qui doit être favorisée, pour permettre un avancement des dates de récolte. Cette esquive peut être obtenue par l'avancement des dates de semis et/ou le recours à des variétés plus précoces.



Pour en savoir plus

BRISSON N, LEVRAULT F, 2010. Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces. Le livre vert du projet CLIMATOR (2007-2010). ADEME.

RAY, Deepak & Ramankutty, Navin & Mueller, Nathaniel & West, Paul & A Foley, Jonathan. (2012). Recent patterns of crop yield growth and stagnation. Nature communications. 3. 1293. 10.1038/ncomms2296.

GATE P., VIGNIER L., DEUDON O., & GOUACHE D. ; 2009. Changement climatique : impact sur le blé en France et pistes d'adaptation. Conséquences et enseignements pour les grandes cultures et l'élevage herbivore, 85-99. Paris.

COLOMBIE et al, ORACLE Pays de la Loire, 2017, <https://pays-de-la-loire.chambres-agriculture.fr>

LEVRAULT et al, ORACLE Poitou Charentes, 2015, <https://deux-sevres.chambre-agriculture.fr>



C2-Rendement en maïs grain

🔑 Nature et source des données

Données fournies par la DRAAF

🕒 Indicateur 1

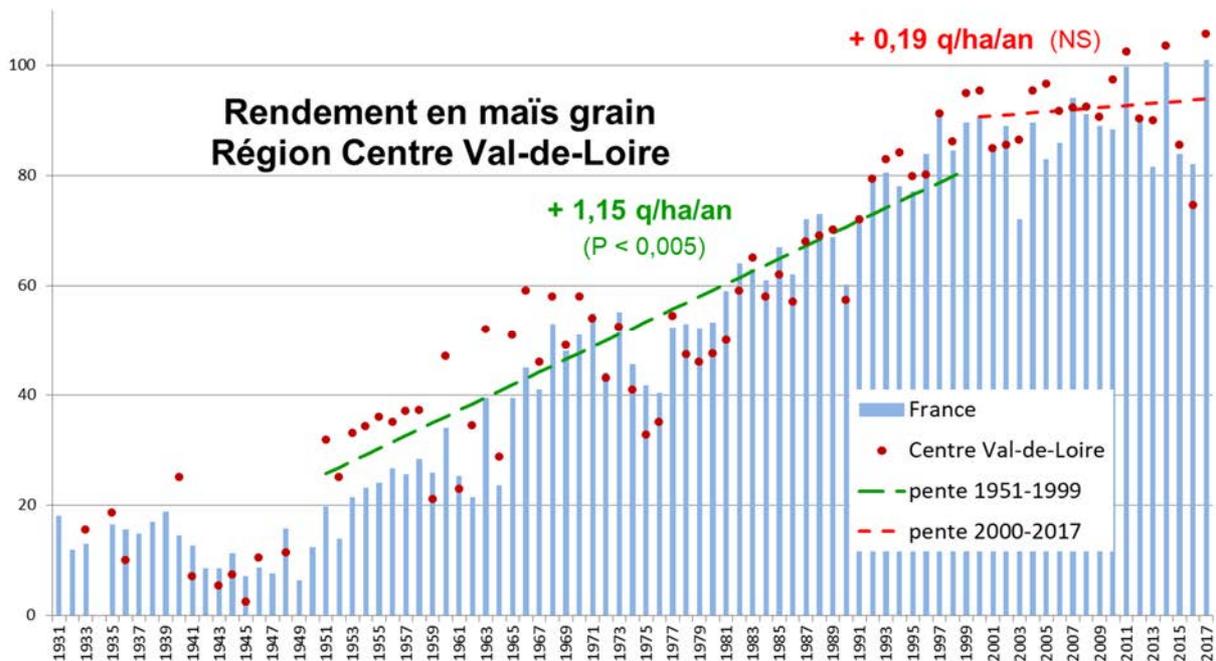
Evolution des rendements régionaux en maïs grain de 1931 à 2017. Nombreuses données manquantes avant 1951.

🧮 Calcul de l'indicateur 1

- Evolution des rendements en France (diagramme en bâtons bleu clair)
- Evolution des rendements en région Centre Val-de-Loire (nuage de points rouge)
- Tendence linéaire en région Centre Val-de-Loire sur la période 1951 – 1999 (tiret large vert)
- Tendence linéaire en région Centre Val-de-Loire sur la période 2000-2017 (tiret large rouge)

📈 Évolution observée

q = quintal = 100 kg



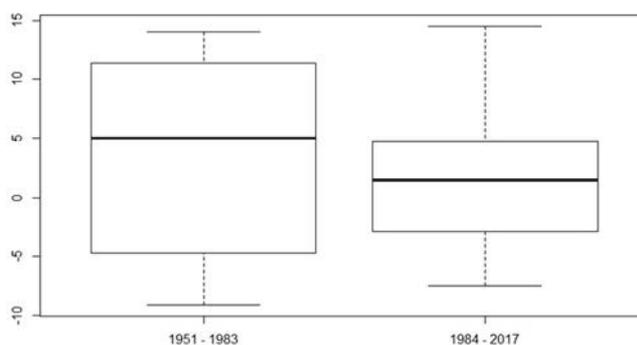


C2-Rendement en maïs grain

Analyse

- L'évolution des rendements en maïs grain observé en région Centre Val-de-Loire depuis 1951 montre que la tendance linéaire observée sur l'ensemble de la période 1950 – 2017 est en augmentation de **+ 1,14 quintal par hectare et par an** de façon très significative ($P < 0,05$). Idem pour la tendance au niveau national avec + 1,23 quintal par hectare et par an. Cependant, même si la tendance n'est pas significative, on observe un ralentissement de cette augmentation avec **+ 0,19 quintal par hectare et par an** de 2000 à 2017.
- Ces évolutions se retrouvent dans la moyenne des régions voisines. Par exemple, en Poitou-Charentes, +1,57 q/ha/an de 1989 à 2015 (Colombie et al, 2017).
- De 1951 à 2017, le rendement moyen français (61,3 q/ha) est sensiblement inférieur au rendement de la région Centre Val-de-Loire (63,8 q/ha). Il semble que ces 2 rendements aient évolué depuis 1951, on note :
 - **+ 3,48 q** de 1950 à 1983 entre le rendement moyen régional (43,1 q/ha) et français (39,6 q/ha)
 - **+ 1,6 q** de 1984 à 2017 entre le rendement moyen régional (83,9 q/ha) et français (82,3 q/ha).

Cette évolution reste à confirmer car elle n'est pas significative actuellement selon le test de Student ($P = 0,24$).



Différence de rendement du maïs grain entre la moyenne nationale et régionale au cours de la seconde moitié du XXème siècle (source : RStudio, test Student, $P = 0,24$)



C2–Rendement en maïs grain



Indicateur2

Evolution des rendements départementaux en maïs grain de 1933 à 2017. Nombreuses données manquantes avant 1951.



Calcul de l'indicateur 2

- Evolution des rendements départementaux (nuage de points bleus)
- Tendence linéaire en département sur la période 1951 – 1999 (tiret vert)
- Tendence linéaire en département sur la période 2000 – 2017 (tiret rouge)
- Rendement maximum (point violet)



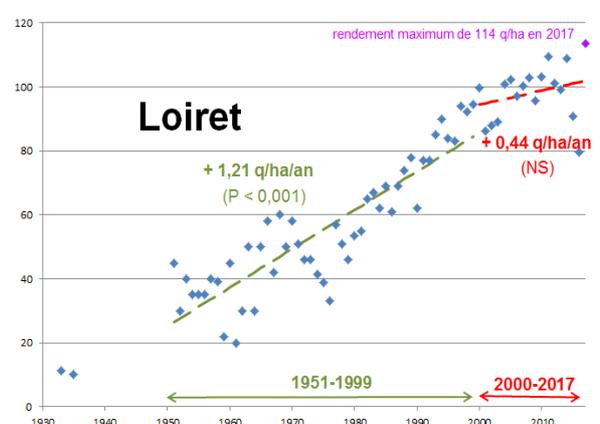
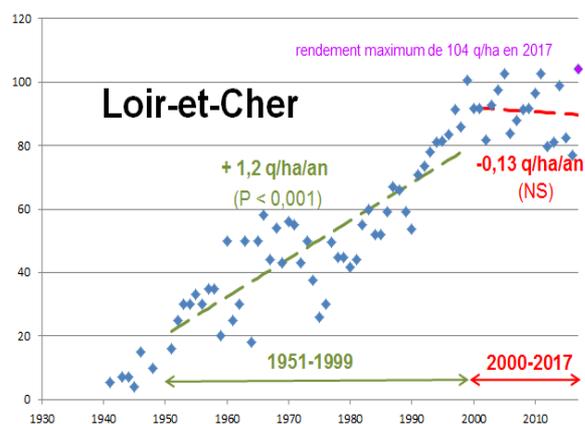
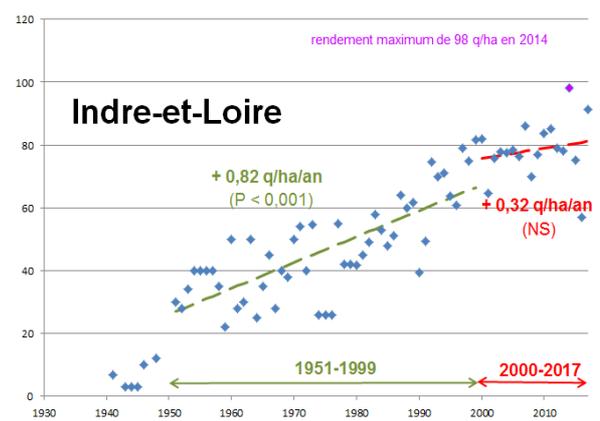
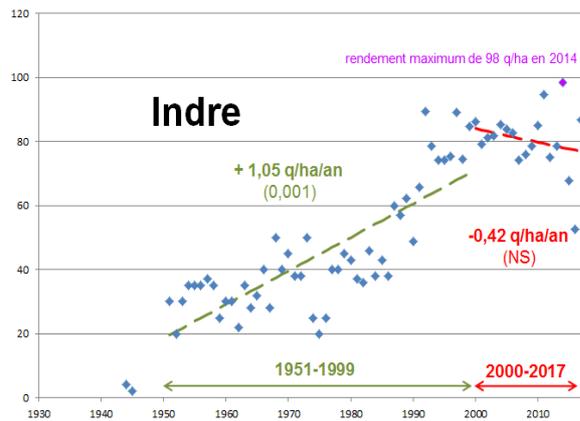
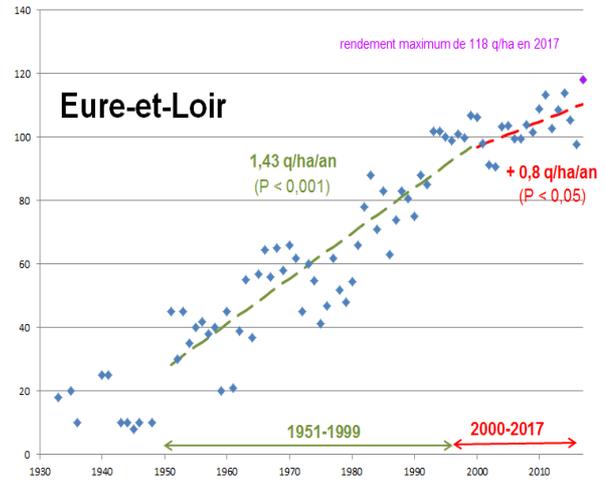
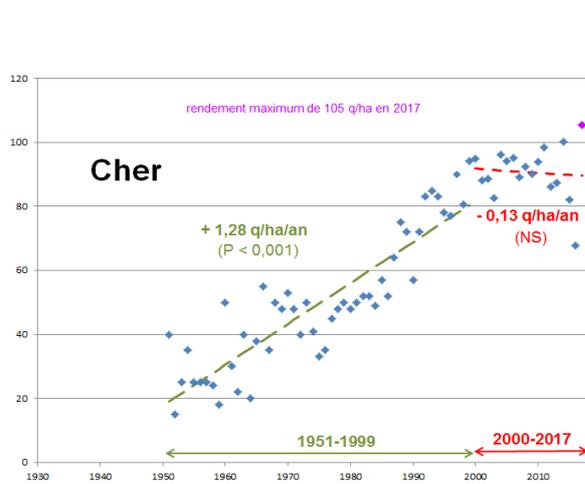
Évolution observée

q = quintal = 100 kg

3 IMPACTS AGRICOLES



C2-Rendement en maïs grain





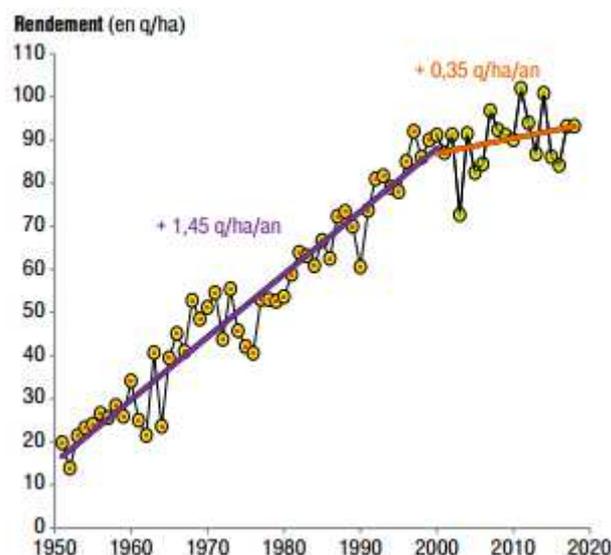
C2–Rendement en maïs grain

Analyse

Les rendements records en maïs grain ont eu lieu en 2017 (départements 18, 28, 41 et 45) ou en 2014 (départements 36 et 37). Tous les départements observent une forte augmentation de rendement du maïs grain d'une moyenne de 1,1 quintal par hectare et par an depuis 1951 jusqu'à la fin des années 1990 avec un écart important entre l'Indre-et-Loire (+ 0,82 q/ha/an) et l'Eure-et-Loir (+ 1,43 q/ha/an).

Depuis le début des années 2000, le rendement moyen continue à augmenter mais avec un ralentissement de sa progression dans le département de l'Eure-et-Loir (+0,82 q/ha/an), Indre-et-Loire (+0,32 q/ha/an) et Loiret (+0,44 q/ha/an), ainsi qu'une légère diminution est observée dans les départements de Cher et Loir-et-Cher (-0,13 q/ha/an) et Indre (-0,42 q/ha/an).

Ces résultats sont semblables au reste de la France où le gain de rendement du maïs grain est de 1,43 q/ha/an de 1951 jusqu'à 1999 et de 0,35 q/ha/an à partir du début des années 2000.



Evolution du rendement moyen du maïs grain en France

Source : Arvalis, 2019

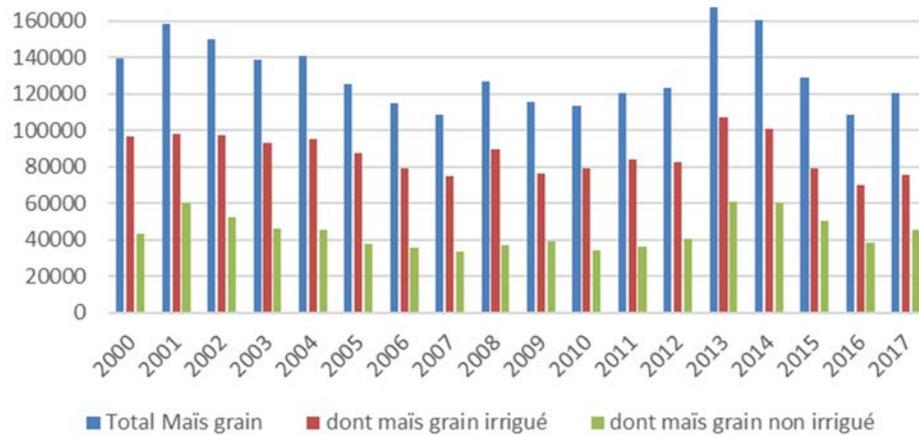
Cette augmentation se retrouve dans les pays du Nord de l'Europe. Dans les pays du Sud et de l'Est de l'Europe, comme l'Italie ou la Hongrie, le rendement du maïs stagne (Ray et al., 2012).

Le progrès génétique constant, élevé et transféré rapidement (marché dynamique des obtenteurs) a largement contribué à cette augmentation de rendement. L'estimation de l'apport du progrès génétique entre 1986 et 2017 au niveau national est en moyen de l'ordre de 1,2 q/ha/an. (Lorgeou et al, 2019)

Les surfaces de maïs grain irriguées sont en moyenne de 87000 hectares depuis 2000 en Région Centre Val-de-Loire (données DRAAF), avec une proportion de l'ordre de 66 % des surfaces de maïs grain. Ces surfaces irriguées (et irrigables) qui varient sensiblement d'une année sur l'autre ont participé au maintien de la progression des rendements et à sa régularité (diminution du risque de stress hydrique).



C2-Rendement en maïs grain



Evolution des surfaces de maïs en Région Centre Val-de-Loire (en hectares)

A l'inverse, le réchauffement de la température a aussi provoqué un déplacement géographique vers le nord d'espèces de ravageurs (ex : sésamie) et l'accélération de leurs cycles de reproduction (ex : pyrale) qui perturbent les cultures (Lorgeou et al., 2009).

Le rendement du maïs est fortement influencé par la disponibilité de l'eau, de la moitié du stade montaison jusqu'au stade grains pâteux. La période la plus sensible au déficit hydrique s'étend du début juillet au fin août pour un semis mi-avril. Un stress thermique trop important provoque des défauts de fécondation et des avortements des grains, ainsi que des baisses de croissances des grains (Arvalis, 2016).

Or, bien que les précipitations estivales ne présentent pas d'évolutions significatives en 58 ans, les ETP ont augmenté du fait des augmentations des températures. Le déficit hydrique climatique estival a fortement augmenté de l'ordre de -40 mm en 58 ans, avec toutefois des grandes différences entre le Nord et le Sud de la Loire (voir fiche « Cumul du déficit hydrique climatique »). Il est fort probable qu'à l'avenir la contrainte en eau risque d'être plus forte dans ces périodes estivales, engendrant des restrictions de l'utilisation de l'eau plus ou moins importantes suivant l'état des réserves hivernales. Les déficits et les restrictions en eau pourront provoquer des pertes significatives du rendement (Lorgeou et al., 2009). Cette diminution de surfaces irriguées de maïs a déjà été observée à l'échelle nationale lors du dernier recensement agricole (Lerbourg, 2012).

Sur la période 1959 – 2017, la disponibilité thermique a augmenté dans la région Centre Val-de-Loire (voir fiche « culture intermédiaire »), ce qui a raccourci la durée du cycle de la culture. Ce phénomène s'illustre par une précocité du stade de floraison en France d'une moyenne de 5 jours par décennie, du stade de maturité du grain d'une moyenne de 10 jours par décennie entre 1981 et 2006 (Souverain, 2009) et des dates de récolte de l'ordre d'une semaine par décennie entre 1969 et 2003, (Lorgeou et al, 2009).

La durée du cycle étant un facteur de moins en moins limitant, des variétés plus tardives sont utilisées pour valoriser au mieux cette augmentation de somme de température (Brisson & Levrault, 2010).



C2–Rendement en maïs grain



A RETENIR

- On observe en région Centre Val-de-Loire une augmentation des rendements de maïs grain de **+ 1,14 quintal par hectare et par an** sur la période 1951-2017. Cependant, il semblerait que cette évolution ralentisse avec **+ 0,19 quintal par hectare et par an** de 2000 à 2017.

En région Centre Val-de-Loire, 2/3 du maïs est irrigué. Ainsi, si l'augmentation des températures et du déficit hydrique estival entraîne des restrictions d'usage de l'eau à ces périodes clés du cycle du maïs, cela entraînera indubitablement des pertes de rendement plus marquées à l'avenir.

Des voies complémentaires d'adaptation sont envisageables :

- l'amélioration de l'efficacité de l'irrigation (sonde tensiométrique) et économie d'eau (matériel d'irrigation) ;
- l'esquive de ces stress, par des dates de semis avancées et des choix de variétés plus précoces ;
- le recours à des variétés plus tolérantes aux stress hydriques.



Pour en savoir plus

ARVALIS. ; 2016. Stress hydrique. Les fiches accidents Maïs. [en ligne] Disponible sur : http://www.fiches.arvalis-infos.fr/fiche_accident/fiches_accidents.php?mode=fa&type_cul=3&type_acc=5&id_acc=155. Consulté le 23/01/2019

BRISSON N. & LEVRAULT F. ; 2010. Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces. Le livre vert du projet CLIMATOR (2007-2010). Ademe, 334p.

COLOMBIE et al, ORACLE Pays de la Loire, 2017, <https://pays-de-la-loire.chambres-agriculture.fr>

LERBOURG J. ; 2012. Des surfaces irrigables en baisse à partir de 2000. Agreste Primeur, 292, 4p.

LORGEOU J. ; AUDIGEOS D. ; MARTIN B., 2019. Progrès génétique de 1986 à 2017 : LES APPORTS du renouvellement des variétés.

LORGEOU J., PIRAUX F., RUGET F., LACROIX B., SOUVERAIN F., CHARCOSSET A., BOUTHIER A.,

RAY D. K., RAMANKUTTY N., MUELLER N. D., WEST P. C., & FOLEY J. A. ; 2012. Recent patterns of crop yield growth and stagnation. Nature communications(3), 7p

SOUVERAIN Franck, 2009. Impact du changement climatique sur maïs grain et maïs fourrage. Questions posées et pistes d'adaptation. 63p.



C3–Dates de débourrement, floraison et maturité du raisin

Nature et source des données

Données fournies par la SICAVAC (18), la Chambre d'Agriculture d'Indre-et-Loire (37) et la Chambre d'Agriculture de Loir-et-Cher (41).

Indicateur 1

Evolution des dates de débourrement, floraison et maturité de la vigne :

- Sancerre (18) : de 1965 à 2018
- Coteaux du Cher (41) : de 1980 à 2018
- Saint-Nicolas-de-Bourgueil et Vouvray (37) : de 1980 à 2019 (uniquement la date du ban des vendanges)

Calcul de l'indicateur 1

- Evolution des dates de débourrement de la vigne (losanges bleus)
- Evolution des dates de floraison de la vigne (carrés rouge)
- Evolution des dates de maturité (triangle vert)
- Courbe de tendance (trait plein noir)

Évolution observée

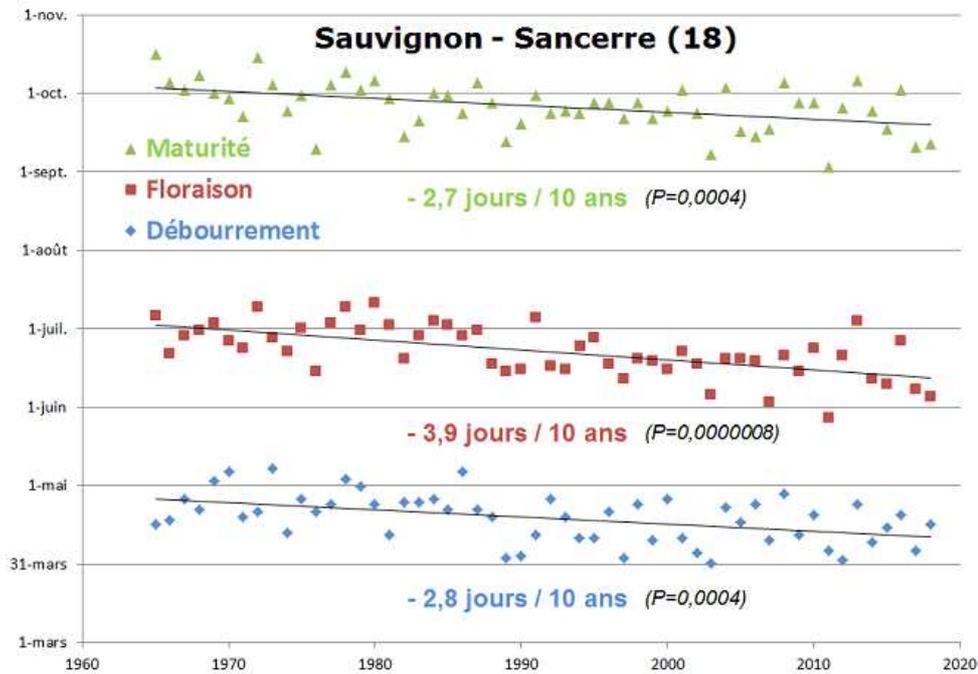
Le débourrement correspond à la date à laquelle 50 % des bourgeons sont au stade C, pointe verte visible, défini par Baggiolini en 1952.

La floraison est définie ici par la date à laquelle 50 % des fleurs sont ouvertes.

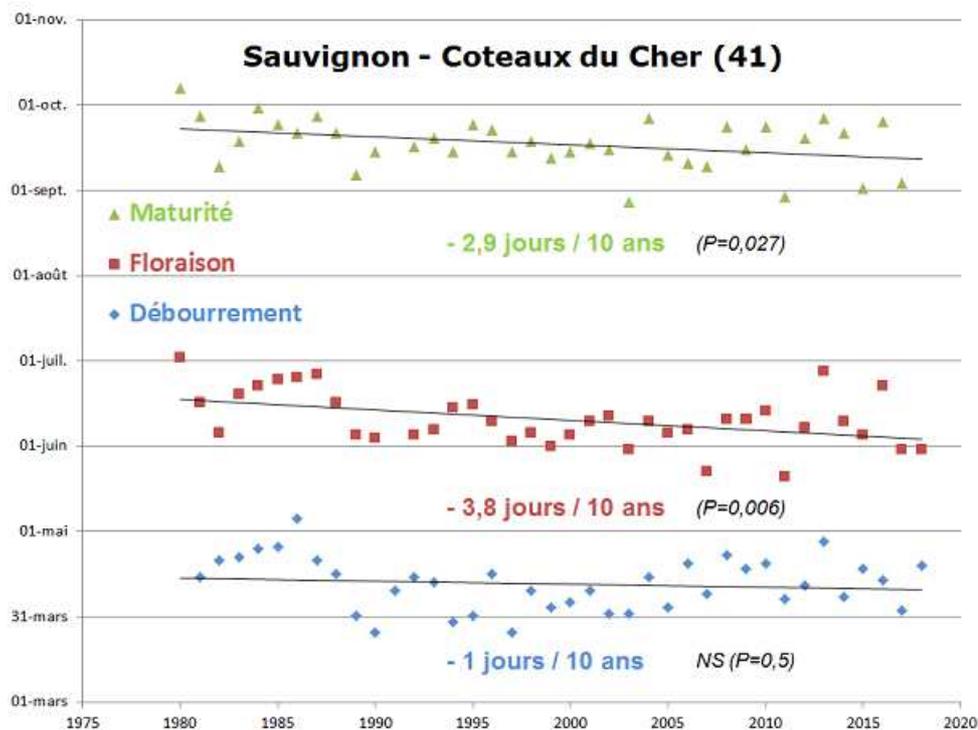
La date de maturité correspond à une concentration de 200 g/l de sucre dans le raisin.



C3-Dates de débourrement, floraison et maturité du raisin



Evolution des dates de débourrement, floraison et maturité du raisin dans le 18 - Cépâge Sauvignon



Evolution des dates de débourrement, floraison et maturité du raisin dans le 41 - Cépâge Sauvignon



C3–Dates de débourrement, floraison et maturité du raisin



Département	Coteaux du Cher (41)						Sancerre (18)		St-Nicolas-de-Bourgueil (37)	Vouvray (37)
Cépage	Sauvignon	Chardonnay	Chenin	Gamay	Cabernet	Cot	Sauvignon	Pinot	Cabernet	Chenin
Période étudiée	1980 - 2018 (39 ans)						1965 - 2018 (54 ans)		1980 - 2019 (40 ans)	
Débourrement	-1,0 <i>NS</i>	-0,4 <i>NS</i>	-1,6 <i>NS</i>	-0,5 <i>NS</i>	-2,0 <i>NS</i>	-0,6 <i>NS</i>	-2,8 <i>(P=0,0004)</i>	-3,6 <i>(P=0,00003)</i>		
Floraison	-3,8 <i>(P=0,006)</i>	-4,3 <i>(P=0,001)</i>	-4,7 <i>(P=0,0003)</i>	-3,8 <i>(P=0,0047)</i>	-5,0 <i>(P=0,00009)</i>	-3,8 <i>(P=0,004)</i>	-3,9 <i>(P=0,000008)</i>	-4 <i>(P=0,0000005)</i>		
Récolte	-2,9 <i>(P=0,027)</i>	-3,9 <i>(P=0,005)</i>	-4,2 <i>(P=0,01)</i>	-2,2 <i>NS</i>	-3,2 <i>(P=0,03)</i>	-1,9 <i>NS</i>	-2,7 <i>(P=0,0004)</i>	-3 <i>(P=0,0002)</i>	-2,4 <i>(P=0,03)</i>	-4,5 <i>(P=0,0002)</i>

Evolution des dates physiologiques de la vigne (en nombre de jour par décennie)

- L'évolution de la date du début débourrement en Loir-et-Cher n'est pas significative alors qu'elle est en baisse de 3,2 jours par décennie dans le Sancerrois.
- L'évolution de la date de floraison est en baisse significative sur tous les vignobles étudiés, avec en moyenne une avancée de 4,2 jours par décennie.
- L'évolution de la date de la maturité est en baisse significative sur la majorité des vignobles, avec en moyenne une avancée de 3 jours par décennie.



L'avancée du stade du débourrement, de la floraison et de la maturité observée, est expliquée par l'augmentation des températures due au changement climatique, puisque la phénologie de la culture de la vigne est liée aux températures cumulées (Brisson & al., 2010). Ceci est cohérent avec l'augmentation de l'indice de Winkler étudié (Voir fiche B4 « indice Winkler »). La durée du cycle de la vigne dépend du cumul des températures supérieures à 10°C pendant la phase de végétation.

Plusieurs études ont mis en évidence l'avancée des stades phénologiques de la culture de la vigne en lien avec l'augmentation des températures. A titre d'exemple, les dates des principaux stades de développement de la vigne en Alsace n'ont pas évolué de manière significative jusqu'au début des années 80. Depuis cette période, les dates de débourrement et de floraison, pour le Riesling, ont avancé d'environ 15 jours, celle de véraison d'environ 23 jours (MTES, 2017).

L'avancée des stades phénologiques a de nombreuses répercussions :

- l'avancée de la date du débourrement augmenterait le risque du gel à ce stade critique.
- la maturation des raisins se manifestant plus tôt, à des températures plus élevées, cela impacte la composition des raisins et du vin produit. Une augmentation de la teneur en sucre et une diminution de l'acidité ont été observées au cours de ces dernières années. (Leuween & al, 2016)



C3–Dates de débourrement, floraison et maturité du raisin

Les leviers d'adaptation peuvent être répartis en deux grandes classes : celles qui s'appuient sur la modification des génotypes et celles qui se basent sur le changement des techniques culturales (Leeuwen et al, 2016). L'introduction des nouveaux cépages et/ou porte-greffe à maturation très tardives, ou capables de produire des vins de haute qualité à des températures élevées pourrait être un levier d'adaptation de la viticulture face au changement climatique (Duchêne et al, 2010).

Plusieurs techniques viticoles ont été proposées pour faire face à la précocité des stades phénologiques de la vigne notamment le recours à une taille tardive qui pourrait retarder la phase de débourrement (Leeuwen et al, 2016), mais également le rognage, l'effeuillage, le travail du sol...



A Retenir

En région Centre Val de Loire, on observe une précocité des stades phénologiques de la vigne, avec une avancée moyenne de 3,2 jours par décennie pour le débourrement, 4,2 jours pour la floraison et de 3 jours pour la date de la maturité.

Ce phénomène est expliqué en parti par le changement climatique, car la phénologie de la vigne est corrélée aux cumuls de température (somme de températures moyennes supérieures à 10 °C).

Le recours à de nouveaux cépages améliorés génétiquement et à des pratiques culturales pourraient être des leviers d'adaptation de la vigne face au changement climatique.



Pour en savoir plus

- BRISSON N, LEVRAULT F, 2010. Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces. Le livre vert du projet CLIMATOR (2007-2010). ADEME.

- DUCHENE E., & Schneider, C. (2005). Grapevine and climatic changes: a glance at the situation in Alsace. *Agronomy for sustainable development*, 25(1), 93-99.

- DUCHENE E., Huard, F., Dumas, V., Schneider, C., & Merdinoglu, D. (2010). The challenge of adapting grapevine varieties to climate change. *Climate research*, 41(3), 193-204.

- Ministère de la Transition écologique et solidaire (MTES), (2017). <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/impacts-du-changement-climatique-agriculture-et-foret#e1>

- VAN LEEUWEN C., & Darriet P. (2016). Le changement climatique en viticulture: les leviers d'adaptation au vignoble. In Acte de colloque. Les 3èmes Assises des vins du Sud-Ouest. Maîtriser le profil des vins dans un contexte de changement climatique. 2016; 3. Assises des Vins du Sud-ouest, Toulouse, FRA, 2016-01-14-2016-01-14, 15-18.



C4–Teneur en sucre et en acidité totale des raisins

Nature et source des données

Données fournies par la SICAVAC (18), le laboratoire de Touraine (37) et la Chambre d'Agriculture de Loir-et-Cher (41).

Indicateur 1

Evolution de la teneur en sucre et en acidité totale (le 10 septembre de chaque année) :

- Cher (18): de 1965 à 2018
- Indre-et-Loire (37) : de 1959 à 2018
- Loir-et-Cher (41) : de 1973 à 2018

Calcul de l'indicateur 1

- Evolution de la teneur en sucre (nuage bleu) ;
- Evolution de la teneur en acidité totale (nuage rouge) ;
- Courbe de tendance de la teneur en sucre (trait bleu) ;
- Courbe de tendance de la teneur en acidité totale (trait rouge).

Évolution observée

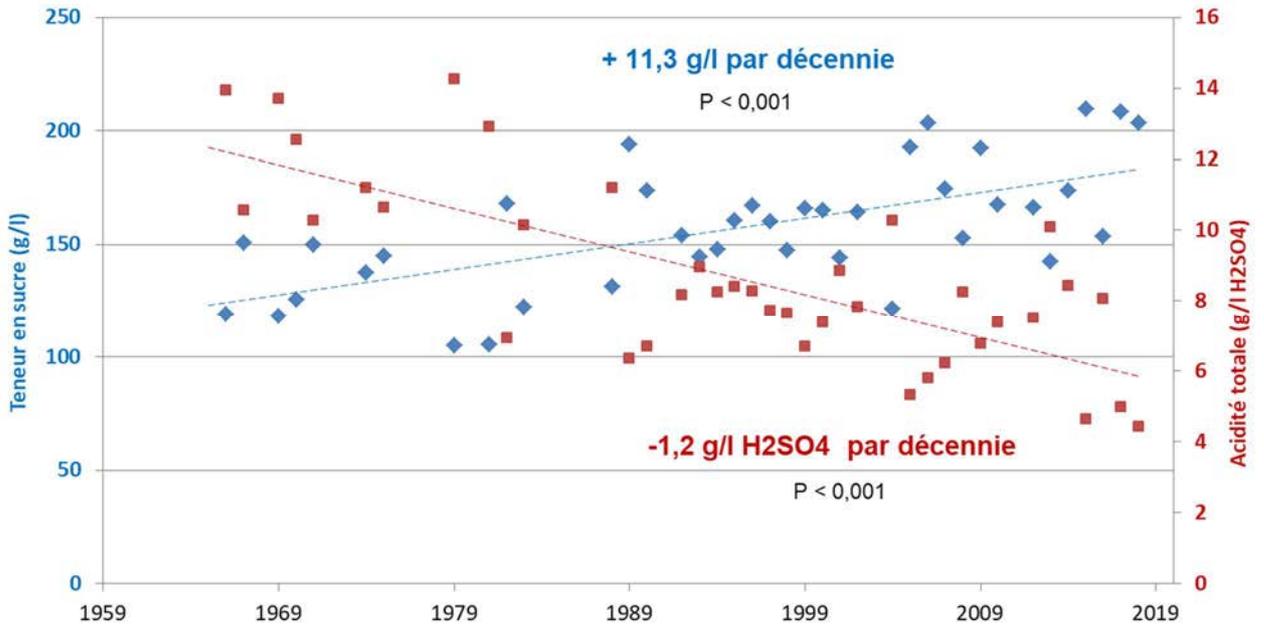
- **en abscisse** : Année
- **en ordonnée** :
 - Bleu : Teneur en sucre en g/l
 - Rouge : Acidité totale en g/l H₂SO₄

Le sucre est à l'origine des degrés d'alcool dans le vin, par sa transformation en éthanol pendant la vinification.

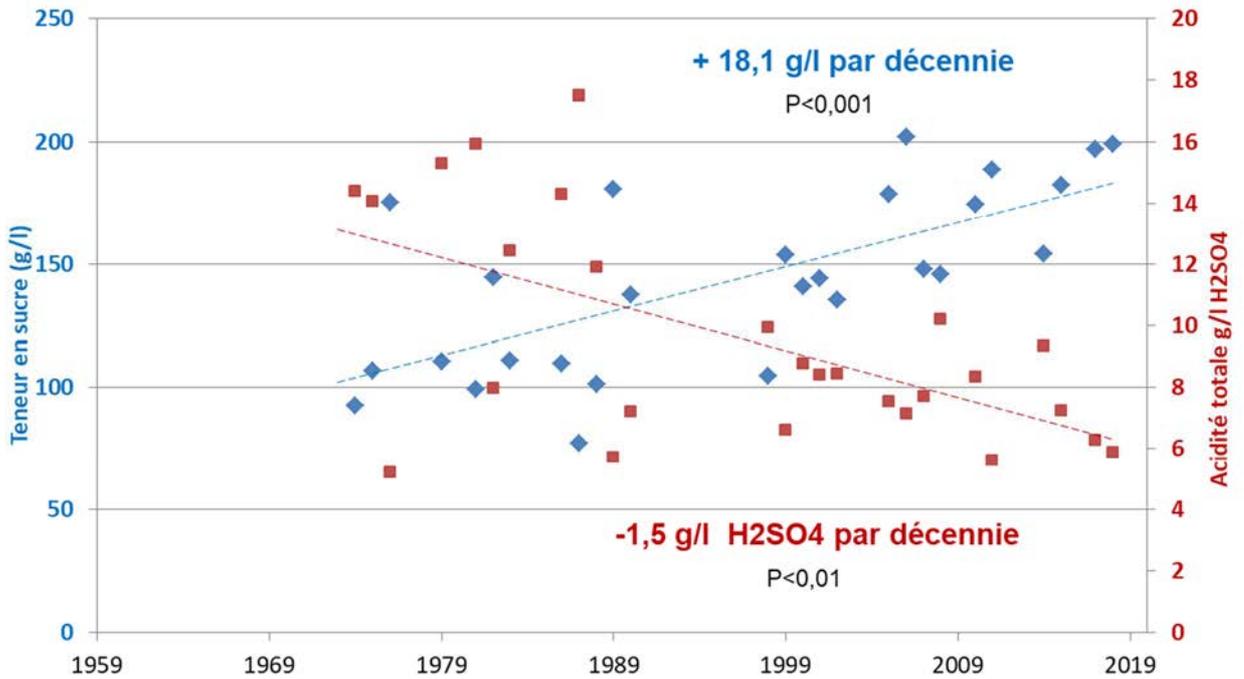
Les acides régulent le pH lors de la vinification et jouent un rôle dans les caractéristiques organoleptiques du vin. La teneur en sucre des raisins est corrélée négativement avec leur acidité totale.



C4-Teneur en sucre et en acidité totale des raisins



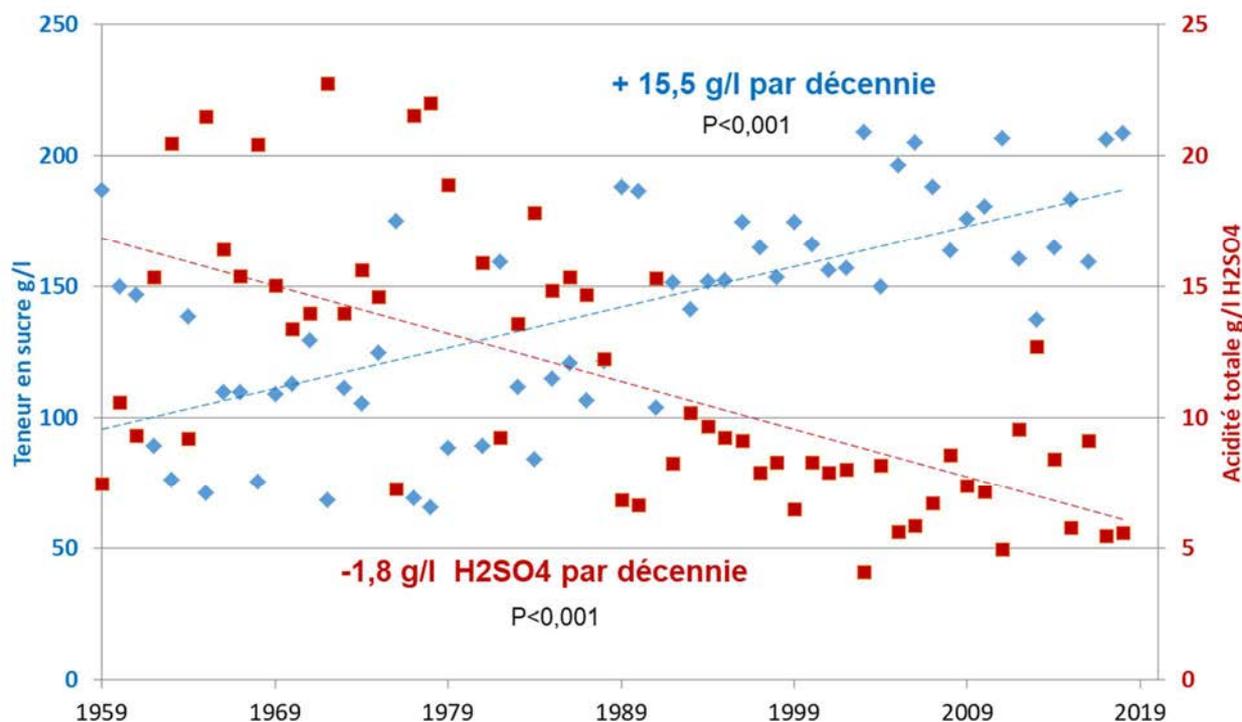
Evolution de la teneur en sucre et en acidité totale dans le Cher - Cépage Sauvignon



Evolution de la teneur en sucre et en acidité totale en Loir-et-Cher - Cépage Sauvignon



C4–Teneur en sucre et en acidité totale des raisins



Evolution de la teneur en sucre et en acidité totale en Indre-et-Loire - Cépage Chenin

Evolution de la teneur en sucres						
Dép.	Cépage	1ère année disponible	évolution (en g/l/10 ans)	Test	"Force" de la tendance	R ²
18	Sauvignon	1966	+ 11,29	1,2E-05	très hautement significative	0,41
	Sauvignon	1974	+ 17,24	1,4E-05		0,48
41	Cabernet	1974	+ 18,08	6,6E-05		0,48
	Gamay	1974	+ 16,2	6,3E-07		0,58
37	Chenin	1959	+ 15,49	1,2E-08		0,44
	Cabernet	1959	+ 13,54	1,5E-07		0,38



C4–Teneur en sucre et en acidité totale des raisins

Evolution de la teneur en acidité totale						
Dép.	Cépage	1ère année disponible	évolution (en g/l H ₂ SO ₄ /10 ans)	Test	"Force" de la tendance	R ²
18	Sauvignon	1966	-1,22	5,7E-08	très hautement significative	0,55
41	Sauvignon	1974	-0,85	0,004		0,25
	Cabernet	1974	-1,52	0,001		0,35
	Gamay	1974	-0,69	0,006		0,23
37	Chenin	1959	-1,82	4,5E-08		0,41
	Cabernet	1959	-1,48	2,8E-05		0,27

Rq : les graphiques non diffusés dans ce document sont disponibles sur demande

Analyse

L'augmentation de la température moyenne et l'indice de fraîcheur des nuits (voir fiche « B5 ») pendant la phase de la maturation a un effet sur la composition des raisins et du vin produit. Une augmentation de la teneur en sucre et une diminution de l'acidité a été prouvée au cours de ces dernières années. En effet la teneur en sucre est corrélée négativement avec l'acidité totale des raisins (Duchêne et al, 2005).

Dans la région Centre Val-de-Loire, pour le cépage « **Sauvignon** », une augmentation de la teneur en sucre de :

- **11,3 g/l par décennie** est observée dans le Cher (18) entre la période 1965-2018 ;
- **17,2 g/l par décennie** dans le Loir-et-Cher (41) entre la période 1973-2018.

Par ailleurs, l'acidité totale a baissé de :

- **1,2 g/l H₂SO₄ par décennie** dans le Cher (18) entre la période 1965 et 2018
- **0,8 g/l H₂SO₄ par décennie** dans le Loir-et-Cher (41) entre la période 1973 et 2018.

Concernant le 41, d'autres cépages ont connu la même tendance d'évolution, notamment pour le **Cabernet** et le **Gamay**, qui ont enregistré une augmentation de la teneur en sucre respectivement de **18,08 g/l par décennie** et de **16,2 g/l par décennie**, et une diminution de l'acidité totale respectivement de **1,52 g/l H₂SO₄ par décennie** et **0,69 g/l H₂SO₄** entre 1973 et 2018.

De même, pour le cépage **Chenin** et **Cabernet** dans le département d'Indre-et-Loire (37), la teneur en sucre a augmenté respectivement de **15,49 g/l par décennie** et de **13,54 g/l par décennie** et l'acidité totale a diminué respectivement de **1,82 g/l H₂SO₄ par décennie** et **1,48 g/l H₂SO₄ par décennie** pour la période 1959-2018, soit 60 ans.

Une augmentation de la teneur en sucre des raisins induit une augmentation du taux d'alcool. En effet, les sucres se transforment en alcool via le processus de fermentation alcoolique, 16,83 g/l du sucre produisent 1% d'alcool en volume :



C4–Teneur en sucre et en acidité totale des raisins



L'augmentation de la teneur en sucre des raisins est expliquée, d'une part, par le réchauffement climatique que la région a connu ces dernières années (le taux de sucres dépendant fortement de l'ensoleillement), et d'autre part, par le changement des techniques viticoles et œnologiques qui peuvent avoir également une influence (Neethling et al, 2011), à savoir :

- ✓ L'effeuillage et l'éclaircissage de la vigne pratiqués ces dernières années par les vignerons, permettraient une optimisation de l'ensoleillement des baies et une diminution de l'évapotranspiration, et par conséquent, un raisin plus sucré et moins acide ;
- ✓ La pratique de l'enherbement inter-rang à la place du désherbage chimique, engendre plus de concurrence à la vigne et induit une diminution de sa vigueur. Par conséquent, cela pourrait favoriser une augmentation de la teneur en sucre et une diminution de l'acidité totale des raisins ;
- ✓ L'utilisation des levures exogènes pour favoriser la fermentation alcoolique.

Concernant l'évolution de l'acidité totale, cet indicateur demanderait à être approfondi au niveau biochimique car elle est composée de nombreux acides (malique, tartrique...) qui vont réagir différemment par rapport à la température.



A retenir :

Une augmentation de la teneur en sucre et une diminution de l'acidité des raisins ont été observées dans tous les départements viticoles de la région (Cher, Loir-et-Cher et Indre-et-Loire) au cours de ces dernières années.

Ceci est expliqué en parti par le réchauffement climatique, notamment l'évolution de la fraîcheur des nuits, et également par le changement des pratiques viticoles et œnologiques.



Pour aller plus loin

- DUCHENE E., & Schneider C. 2005. Grapevine and climatic changes: a glance at the situation in Alsace. *Agronomy for sustainable development*, 25(1), 93-99;
- NEETHLING E., BARBEAU G., QUENOL H., BONNEFOY C.; 2011. Evolution du climat et de la composition des raisins des principaux cépages cultivés dans le Val de Loire, *Climatologie*(8), 79-92 ;
- <https://www.le-vin-pas-a-pas.com>, consulté le 15 juillet 2018



C5–Date de floraison du Douglas

🔑 Nature et source des données

Données fournies par INRAE Centre Val de Loire (Parc d'Ardon)

🕒 Indicateur

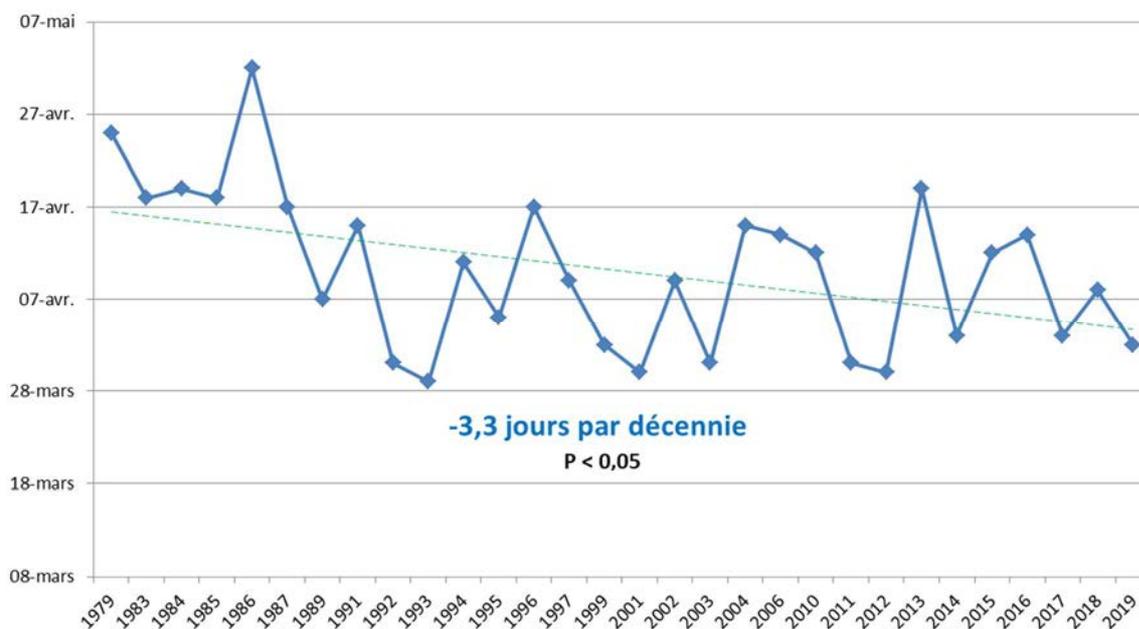
Evolution de la date du début de floraison du Douglas de 1979 à 2019

📊 Calcul de l'indicateur

- Evolution de la date du début de floraison (graphique en courbe)
- Courbe de tendance (tiret vert)

📈 Évolution observée

- **en abscisse** : année
- **en ordonnée** : date de début de floraison



Date de floraison du pin Douglas (INRAE Orléans)



C5–Date de floraison du Douglas



Analyse

Dans la région Centre Val-de-Loire, la forêt et le bois représentent une superficie de 1 030 700 hectares, soit 26% de la superficie totale régionale, et près de 180 millions de m³ sur pied (INSEE et Agreste, 2017). Cette forêt est très majoritairement constituée d'essences feuillues, les conifères ne représentant que 15 % de la surface forestière.

L'augmentation de la température et la hausse du déficit hydrique durant la période de végétation, observée depuis plusieurs décennies, ont plusieurs effets sur les essences forestières.

L'un des effets constatés du changement climatique est la modification des cycles de végétation, caractérisée par un avancement des stades phénologiques (débourrement, floraison et maturation des fruits) (ONF, 2018).

Une avancée de la date moyenne du début de floraison de l'ordre de 3,3 jours par décennie (voir graphique ci-dessus), a été observée à proximité d'Orléans pour le Douglas (conifère très utilisé en reboisement en France). L'amplitude maximale observée sur la période 1979-2019 entre la date la plus précoce (29 mars) et la date la plus tardive (02 mai) s'élève à 34 jours.

Il semblerait toutefois que la date de floraison du douglas ait atteint un palier depuis les années 2000 et aurait même tendance à retarder. Ceci peut être expliqué par le fait que les températures hivernales sont devenues insuffisantes pour permettre aux arbres de vernaliser correctement, ce qui entraîne physiologiquement un besoin accru en degrés jours pour débourrer au printemps (INRAE Centre Val-de-Loire).

En effet, la phénologie des plantes dépend de plusieurs facteurs biologiques, géographiques, édaphiques (liés au sol) et atmosphériques (température, ETP...) (Lebourgeois F et al, 2008)

Plusieurs études ont montré l'effet des aléas climatiques sur la modification des stades phénologiques. À titre d'exemple, en Allemagne, pour les essences *Prunus avium* et *Malus domestica* une augmentation de la température moyenne de 1°C entre février et avril a induit une précocité de la floraison de l'ordre de 5 jours (Chmielewski. F.M et al, 2004).

L'avancée des stades phénologiques pourrait augmenter le risque des dégâts de gelées, ce qui aurait un impact sur la croissance des essences (Breda et al, 2000).

D'autres effets du changement climatique (la sécheresse édaphique et atmosphérique essentiellement), auraient un impact sur les ressources forestières. Le rendement des pins baisserait au niveau national en moyenne de 4,6% dans un futur proche et de 11% dans un futur lointain. Par ailleurs, la répartition géographique des essences serait modifiée (Brisson N. et Levrault F., 2010).



C5–Date de floraison du Douglas



A retenir :

La date de floraison de l'essence douglas a connu une avancée moyenne de l'ordre de 3,3 jours par décennie dans les collections d'INRAE (parc d'Ardon) dû au réchauffement climatique.

Il est encore trop tôt pour savoir si ce phénomène va se poursuivre et entraîner des risques de dégât de gelées au débourrement ou s'il va s'inverser à cause du manque de vernalisation (besoin en froid en hiver).



Pour en savoir plus :

- Breda, N., Granier, A., & Aussenac, G. (2000). Evolutions possibles des contraintes climatiques et conséquences pour la croissance des arbres. *Revue forestière française*.
- Brisson N, Levrault F, 2010. Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces. *Le livre vert du projet CLIMATOR (2007-2010)*. ADEME.
- Chmielewski, F. M., Müller, A., & Bruns, E. (2004). Climate changes and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany, 1961–2000. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121(1-2), 69-78.
- Lebourgeois, F., Pierrat, J. C., Perez, V., Piedallu, C., Cecchini, S., & Ulrich, E. (2008). Déterminisme de la phénologie des forêts tempérées françaises. *Revue Forestière Française*, 60, 3.
- Office Nationale des Forêts (ONF), (2018). « Quels seront les impacts du changement climatique sur les chênaies ligériennes ? »
- INRAE Centre Val-de-Loire, UMR BioForA (INRA-ONF), à Orléans, contact : <https://www6.val-de-loire.inrae.fr/biofora/Contact>



C6 – Date de pleine floraison du pommier : Variété Golden

🔑 Nature et source des données

Données fournies par la Chambre d'Agriculture du Loiret et le Centre Orléanais de Vulgarisation et d'Etudes des Techniques Arboricoles (C.O.V.E.T.A.).

🕒 Indicateur

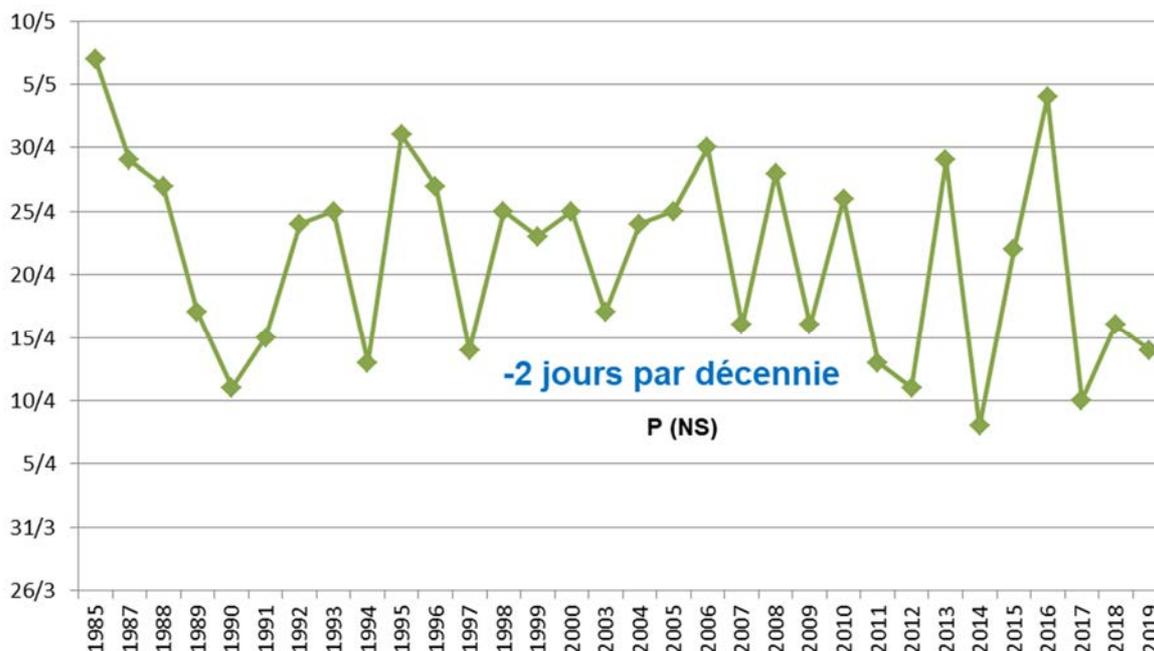
Evolution de la date de pleine floraison (stade F2) du pommier (variété Golden) de 1985 à 2019 dans le département du Loiret (Données manquantes : 1986 ; 2001 ; 2002)

📊 Calcul de l'indicateur

- Evolution de la date de pleine floraison (stade F2) (graphique en courbe)

📈 Évolution observée

- **En abscisse** : année
- **En ordonnée** : date de pleine floraison (stade F2)



Evolution de la date de floraison (F2) du pommier Golden



C6–Date de pleine floraison du pommier : Variété Golden



Analyse

La date de floraison des arbres fruitiers est l'un des indicateurs qui illustrent l'impact du changement climatique, puisque ce stade phénologique est fortement lié aux températures : les températures basses permettraient la levée de la dormance des bourgeons alors que les températures élevées permettraient la croissance de la fleur (MTES).

La date moyenne de pleine floraison (stade F2) du pommier « Golden » dans le département du Loiret est le 21 avril sur la période d'observation 1985-2019 avec de fortes fluctuations annuelles. La date la plus précoce est enregistrée le 08 avril (observée en 2014) et la date la plus tardive a été le 07 mai (observée en 1985). Sur cette période d'étude, une avancée de 2 jours par décennie de la date de pleine floraison est observée pour le « Golden », mais cette tendance n'est pas statistiquement significative.

Par contre, la précocité de la date de floraison des arbres fruitiers est un phénomène observé à l'échelle nationale et même européen depuis la fin des années 80 (Legave, 2009). A titre d'exemple, la date du début de floraison du pommier « Golden Delicious » a été avancée de :

- 2,3 jours par décennie à Angers ($P < 0,01$) depuis 1963 (Colombie, 2018)
- 1,6 jours par décennie à Bergerac depuis 1967 (Fedou, 2019).

Ceci pourrait être expliqué par des phénomènes antagonistes plus ou moins présents : l'allongement moyen de la durée de la dormance (manque de jour froid en hiver retarderait le début du cycle), et le raccourcissement de la durée de la croissance florale (hausse des sommes de température avance le stade levée de dormance à floraison).

Ainsi, à Angers, le réchauffement climatique est responsable de cette avancée, car la moindre rapidité à satisfaire les besoins en froid (vernalisation) et compensé, de façon plus importante, par la satisfaction des besoins en chaleur au stade floraison (Gleizer et al., 2007).

Ces deux phénomènes se compenseraient plus ou moins dans le Loiret. A savoir que, le manque de satisfaction des besoins en froid amène à des floraisons échelonnées. Une baisse de rendement est alors ressentie avec pour cause une réduction du nombre de fleurs ou une mauvaise nouaison en raison des pollinisations décalées (Mathieu, 2011).

Certaines séries, dans d'autres régions, avec plus d'historique permettent d'identifier distinctement cette avancée de stade de floraison avant 1989. Il semblerait que l'année 1989 corresponde à une rupture climatique probable (Legave, 2009). Ici, les années d'études commençant en 1985, cette rupture n'est donc pas visible.

A l'avenir, si l'avancée du stade floraison venait à se confirmer, cela s'accompagnerait par des risques accrus de gel printanier, ce qui engendrerait une irrégularité de la production (Legave, 2009).



C6–Date de pleine floraison du pommier : Variété Golden

Plusieurs voies d'adaptation ont été proposées, à savoir (Legave, 2009) :

- La taille tardive pour échapper à ces risques de gel (difficile à appliquer sur le terrain);
- La maîtrise de la pollinisation afin d'optimiser le potentiel floral ;
- La voie génétique pour avoir des variétés plus résistantes aux stress climatiques.



A retenir :

Une avancée de la date de pleine floraison de la variété « Golden » est observée dans le département du Loiret avec une tendance de 2 jours par décennie sur la période d'observation 1985-2019 mais non significative. Cette tendance a besoin d'être confirmée à l'avenir.

Il semblerait que la vernalisation (besoin de jours froid en hiver) qui n'est plus satisfaite avec le réchauffement climatique hivernale retarde le début du cycle végétatif du pommier.



Pour en savoir plus :

- GLEIZER B., LEGAVE J-M., BERTHOUMIEU J-F., MATHIEU V. ; 2007. Les arboriculteurs face aux changements climatiques. Evolution de la phénologie florale et du risque de gel printanier. *Ctif*(235), 37-40.

- Legave J-M. ; 2009. Comment faire face aux changements climatiques en arboriculture fruitière ? *Innovations Agronomiques*(7), 165-177.

- MATHIEU V. ; 2011. Cycle de développement du pommier. L'influence des conditions climatiques. *Infos Ctif*(277), 34-44.

-Ministère de la Transition écologique et solidaire (MTES) -<https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr>, consulté le 16 Avril, 2019

-FEDOU.N, 2019. ORACLE Nouvelle Aquitaine, <https://nouvelle-aquitaine.chambres-agriculture.fr>, consulté le 13 Mai, 2019

-COLOMBIE, 2018. ORACLE Pays de la Loire, <https://pays-de-la-loire.chambres-agriculture.fr>, consulté le 26 février 2020



C7-Hydraulicité : débits des cours d'eau

Nature et source des données

Données et analyses fournies par la DREAL, Service Eau et Biodiversité

Indicateur 1

Évolution de l'hydraulicité (débit moyen des cours d'eau) des mois de septembre, entre 1997 et 2018.

Calcul de l'indicateur 1

- Évolution de l'hydraulicité (débit moyen des cours d'eau) des mois de septembre, rapporté à la moyenne interannuelle des débits. Lissage en moyenne triennale glissante.
- Classification des classes d'hydraulicité = $\frac{QMM}{1000/QMIA}$
où QMM : "débit mensuel mesuré", il s'agit de la moyenne des débits journaliers obtenus par une mesure des hauteurs (ici débits journalier des mois de septembre)
et QMIA : débit moyen interannuel du mois considéré sur une période donnée

1,00	Exceptionnellement sèche
2,00	Très sèche
3,00	sèche
4,00	Autour de la moyenne
5,00	humide
6,00	Très humide
7,00	Exceptionnellement humide

Classification des classes d'hydraulicité

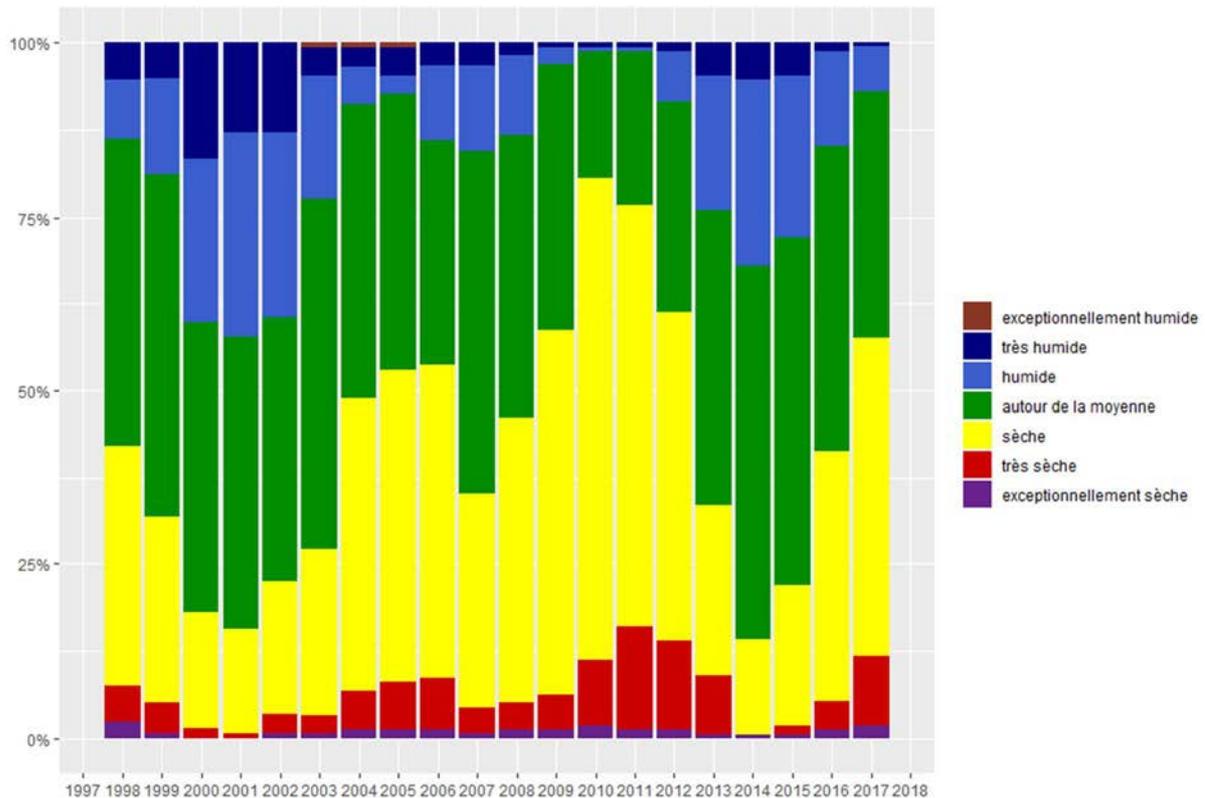
Évolution observée

- En abscisse : années
- En ordonnée : part des cours d'eau de la région Centre-Val de Loire dans chaque classe d'hydraulicité

L'observation des débits moyens de septembre des rivières en région Centre-Val de Loire sur 20 ans ne permet pas d'observer une tendance significative malgré l'application d'une moyenne triennale glissante pour atténuer les variabilités sur les années exceptionnellement humides.



C7-Hydraulicité : débits des cours d'eau



Evolution de l'hydraulicité des mois de septembre en moyenne glissante centrée sur 3 ans

Source : DREAL Centre Val-de-Loire - SEB

Analyse

Les débits moyens des cours d'eau en région Centre-Val de Loire pour les mois de septembre ont été classifiés sur 20 années par rapport à leurs débits de référence. La tendance qui regroupe les catégories d'hydraulicité d'"exceptionnellement sèche" à "sèche" (hydraulicité de 0 à 0,75 soit des débits déficitaires de plus de 25 % en comparaison de la moyenne interannuelle) est assez erratique sur l'ensemble de la période (1998 à 2017).

Des années exceptionnellement humides telles que 2013 et 2014, malgré l'application d'un lissage des variabilités hydrologiques par une moyenne glissante ne permettent pas de conclure à une évolution à la baisse des débits moyens de septembre des rivières en région.

L'analyse des indices hydrologiques réalisée par l'Onema¹ permet d'observer des tendances notamment dans le sud de la France sur la sévérité, la précocité des étiages ou encore l'évolution des débits des cours d'eau ; en revanche pour la région Centre-Val de Loire les résultats ne sont pas significatifs sur ces indicateurs.

L'étude Explore 2070, ainsi qu'un projet portant sur le bassin de la Loire, le projet ICC-HydroQual², ont étudié les conséquences des modifications climatiques sur le comportement et la qualité physico-chimique des cours d'eau et des nappes.



C7-Hydraulicité : débits des cours d'eau

En premier lieu l'augmentation de la température moyenne de l'air va entraîner une hausse de l'évapotranspiration et donc une baisse des débits annuels des cours d'eau, encore accentuée en période d'étiage ³ si les précipitations sont réduites en période estivale. Selon Explore 2070, au sein du bassin Loire-Bretagne le débit moyen annuel des cours d'eau devrait baisser de 10 à 40 % et la recharge des nappes souterraines serait également affectée avec une baisse comprise entre 25 et 30 % à l'horizon 2070.

D'après l'étude ICC-HydroQual, le débit d'étiage de la Loire et de ses principaux affluents baisserait fortement, de l'ordre de 25 à 50 % en milieu du siècle, et entre 30 et 60 % en fin du siècle. On observerait de plus un allongement des périodes d'étiages.

¹ Publication de l'ONEMA (Comprendre pour Agir décembre 2012) « Évolutions observées dans le débit des rivières en France » – sélection d'un réseau de référence et analyse de l'évolution temporelle des régimes des 40 dernières années.

² Le projet ICC-HydroQual (Impact du Changement Climatique sur l'hydrosystème Loire : HYDROlogie, Régime thermique, QUALité des eaux, APR FEDER/EPL, (2009-2010) a réuni l'Université François Rabelais de Tours, l'UMR Sisyphe, le BRGM et le Cemagref.

³ Etiage : période de plus basses eaux des cours d'eau et des nappes souterraines, où l'écoulement ou le niveau d'eau est le plus faible de l'année.

⁴ Débit d'étiage mensuel quinquennal (QMNA5) = débit d'étiage de référence pour l'application de la police de l'eau : il s'agit de la valeur mensuelle statistique du plus petit écoulement d'un cours d'eau sur une période de 5 ans.



A Retenir

Si l'observation des débits moyens de septembre des rivières en région Centre-Val de Loire sur 20 ans ne permet pas d'observer une tendance significative, toutes les modélisations permettant des projections à des horizons 2070 ou 2100 pour le bassin Loire-Bretagne s'accordent sur un phénomène de baisse des débits moyens des cours d'eau de 10 à 40 % et un allongement des périodes d'étiage.



Pour en savoir plus

- Évolutions observées dans le débit des rivières en France - ONEMA (Comprendre pour Agir décembre 2012) – sélection d'un réseau de référence et analyse de l'évolution temporelle des régimes des 40 dernières années : https://reseau-eau.educagri.fr/files/fichierRessource1_debits-des-rivieres.pdf
- Projet Explore 2070 – MTES / DEB / DGEC / DGPR / CGDD, Onema, CETMEF, Agences de l'eau, DREAL de bassin : <https://professionnels.afbiodiversite.fr/node/44>
- Projet ICC-HydroQual (Impact du Changement Climatique sur l'hydrosystème Loire : HYDROlogie, Régime thermique, QUALité des eaux, APR FEDER/EPL, (2009-2010) - Université François Rabelais de Tours, UMR Sisyphe, BRGM et Cemagref : https://archivesic.ccsd.cnrs.fr/METIS_UMR7619/insu-00549254



C8–Niveau des nappes d'eau souterraine

🔑 Nature et source des données

Données et analyses fournies par la DREAL, Service Eau et Biodiversité

🕒 Indicateur 1

Niveau des nappes d'eau souterraines en région Centre-Val de Loire (niveau piézométrique) relevés des mois de septembre depuis 1994.

📊 Calcul de l'indicateur 1

Niveau piézométrique des principaux aquifères de la région Centre-Val de Loire exprimé à partir d'indicateurs : moyenne des niveaux piézométriques mesurés au droit d'un ensemble de stations représentatives d'un aquifère et d'un secteur géographique donné.



Localisation des indicateurs de situation des ressources en eau des nappes en région

Source : DREAL Centre Val-de-Loire – SEB



C8–Niveau des nappes d'eau souterraine

Nom de l'Indicateur	Listes des piézomètres composant les indicateurs
Beauce centrale	Fains-la-Folie, Saint-Léger-des-Aubées, Ouzouer-le-Marché, Epieds-en-Beauce, Batilly-en-Gâtinais
Beauce Montargois	Villemoutiers, Nogent-sur-Vernisson
Beauce Fusain	Batilly en Gâtinais, Corbeilles, Préfontaines
Beauce Blésoise	Séris, Villeromain, Oucques, Champigny-en-Beauce
Calcaires du Berry	Saint-Cyr-en-Val, Crouy-sur-Cosson, Millancay
Calcaires sous Sologne	Saint-Cyr-en-Val, Crouy-sur-Cosson, Millancay
Craie Est Loing	Chevannes, Chuelles
Craie Nord	Langey, Magny, Maintenon, Chateaufort-en-Thymerais, Bû
Craie Loir-et-Cher/Indre-et-Loire	Fortan, Santenay, Ambloy, Channay-sur-Lathan
Craie Sud Indre-et-Loire	Ballan-Mire, Villeloin-Coulange, La Celle-Guenand
Cénomaniens Nord	Arrou, Charbonnières, Moulhard, Montigny-le-Chartif, Saint-Agil
Cénomaniens Nord Loire	Monnaie, Trôo, Morée, Orchaise
Cénomaniens Touraine	Tours, Monnaie, Montbazou
Cénomaniens Sud Indre-et-Loire	Civray-sur-Esves, Le Grand-Pressigny, Bourgueil
Cénomaniens Indre	Baudres, Pellevoisin, Murs
Cénomaniens Cher	Nancay, La Chapelle d'Angillon
Malm Eure-et-Loir	Fretigny, Trizay-Coutretot
Malm Cher	Osmercy, Villequiers, Plaimpied-Givaudins, Veaugues, Rians, Vornay
Malm Indre	Villedieu-sur-Indre, Paudy, Fontgombault, St Martin de Lamps, la Chapelle-Orthemale, Issoudun, Déols
Dogger libre	Nérondes, Blet, Ambrault
Dogger captif	Saint-Baudel, Chezal-Benoît, Arthon, Ruffec-le-Château, Luant, Ardentes
Trias	Maillet, Montgivray, Le Menoux

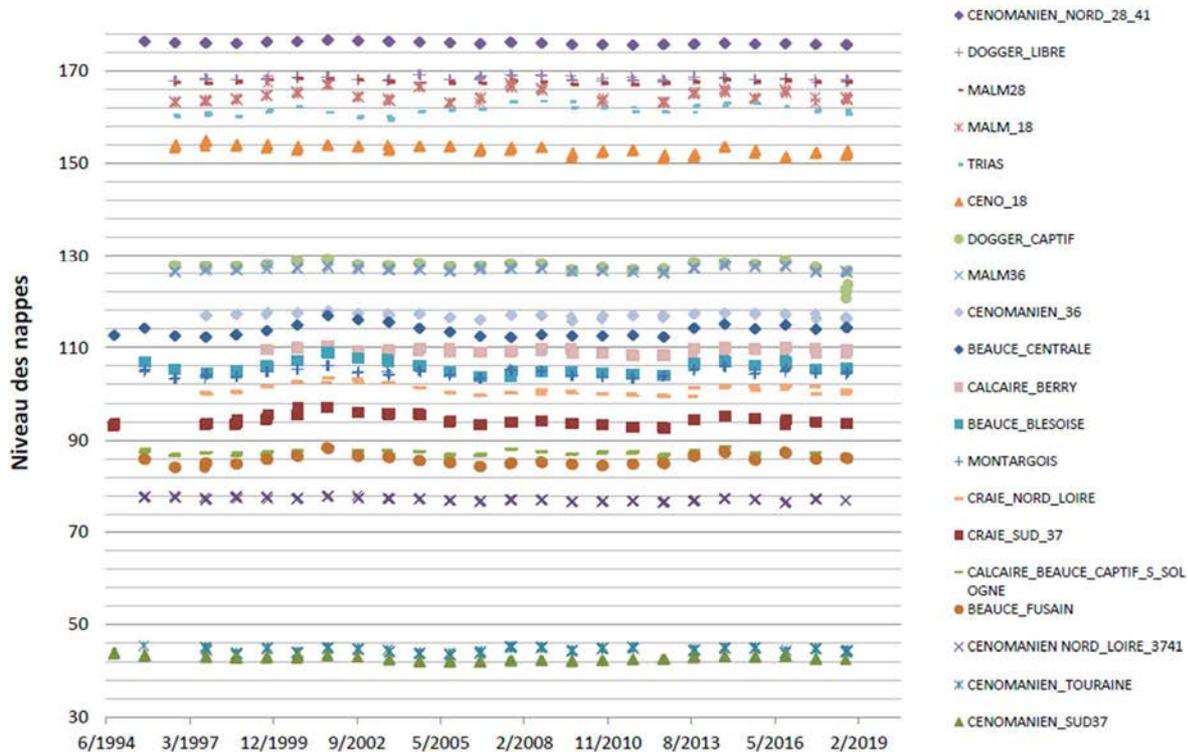
Évolution observée

- En abscisse : Années
- En ordonnée : altitude NGF (nivellement général de la France) du niveau des nappes exprimé en mètres

L'observation des indicateurs des niveaux des nappes ne permet pas de dégager une tendance rétrospective significative.



C8–Niveau des nappes d'eau souterraine



Niveau des nappes de la région Centre Val-de-Loire, relevés des mois de septembre depuis 1994

Analyse

Le réseau piézométrique régional constitue un outil indispensable à la connaissance et au suivi des ressources en eau souterraine. Il se compose de près de 200 stations automatiques et télé-transmises (les piézomètres) qui suivent en continu les fluctuations du niveau des principales nappes d'eau souterraine. Le graphique ci-contre présente les 22 indicateurs des niveaux des nappes de la région aux mois de septembre ; Il s'agit de moyennes de relevés de plusieurs piézomètres pour chaque semaine. Ils donnent une vision synthétique du niveau et de l'évolution de la nappe et sont représentatifs d'une partie homogène de l'aquifère concerné sur une zone donnée.

Le comportement de nappes et leur recharge diffèrent sensiblement en fonction de leurs caractéristiques hydrogéologiques et de leurs potentialités aquifères. Les nappes montrent généralement des cycles annuels de vidange ; celles qui présentent une inertie faible peuvent se recharger et se décharger rapidement. A contrario, certaines nappes telle la nappe de Beauce ont une inertie forte, ce qui les rend moins sensibles aux variations saisonnières. Lorsque le niveau est en baisse, il faut deux à trois années de pluies excédentaires pour inverser la tendance et voir celui-ci remonter ensuite même si entre temps les pluies sont devenues déficitaires.

L'observation des indicateurs des niveaux des nappes ne permet pas de dégager une tendance rétrospective significative.



C8–Niveau des nappes d'eau souterraine

Cependant, les impacts du changement climatique sur les eaux de surface impliqueront des répercussions sur les ressources en eau souterraines. Selon l'étude Explore 2070, la recharge des nappes souterraines serait affectée avec une baisse, sur la moitié de la superficie de son bassin versant, comprise entre 25 et 30 % à l'horizon 2070, ce qui ferait du bassin de la Loire une des deux zones les plus sévèrement touchées au niveau national. La baisse serait plus limitée pour les nappes des plaines alluviales dont le niveau est très lié au niveau de la rivière et à la cote topographique tandis qu'elle pourrait atteindre 10 m sur les plateaux ou contreforts des bassins sédimentaires.



A Retenir

Si l'observation des indicateurs des niveaux des nappes ne permet pas de dégager une tendance rétrospective significative sur 25 ans, selon l'étude Explore 2070 le bassin de la Loire sera sévèrement touché sur la moitié de la superficie de son bassin versant par une baisse comprise entre 25 et 30 % à l'horizon 2070.



Pour en savoir plus

- Site de la DREAL Centre / niveau de nappes :
http://www.donnees.centre.developpement-durable.gouv.fr/Sta_Piezo/cadre_cartReg.htm
<http://drealcentre.aquasys.fr/drealcentre/accueil;jsessionid=1B3AFF6485DC450FD01FDBF0AD3DE62E?0>
- Système d'information pour la gestion des eaux souterraines en Centre-Val de Loire du BRGM : <http://sigescen.brgm.fr/-Hydrogeologie-.html>
- Explore 2070 , Etude et simulation des impacts du changement du climat : <https://professionnels.afbiodiversite.fr/fr/node/44>



DX (prochainement)

 Nature et source des données

Rappel

 Indicateur 1

 Calcul de l'indicateur 1

 Évolution observée

 Analyse



E1-Occupation du sol et matière organique des sols

Nature et source des données

DRAAF- Enquête de TERUTI 1992-2003 et TERUTI LUCAS 2006-2015

Indicateur

Evolution de l'occupation du sol dans la région Centre Val de Loire : sols artificialisés, agricoles, naturels et boisés

Calcul de l'indicateur

- Evolution des territoires agricoles (courbe marron) ;
- Evolution des territoires naturels et boisés (courbe verte) ;
- Evolution des territoires artificialisés (courbe grise).

Évolution observée et analyse

Le sol est une ressource limitée et non renouvelable, il remplit plusieurs fonctions vitales (source principale de production alimentaire, stockage d'éléments chimiques...). L'étude de son occupation est essentielle pour l'observation de l'environnement.

La région Centre Val-de-Loire occupe 3,95 millions d'hectares. En 2015, la région est composée (Source DRAAF Centre) à :

- 61% par des sols agricoles (terres cultivées, prairies, vignes, vergers...)
- 31 % par des zones naturels et boisées
- 9 % par des sols artificialisés

A l'échelle régionale, l'agriculture perd plus de 4600 hectares par an de surface agricole utile depuis 2010. Cette évolution semble diminuer sensiblement puisque le rythme était de – 6500 hectares par an entre 2006 et 2010.

A l'inverse, la surface des sols artificialisés augmente de 3400 ha/an depuis 2010 mais cette artificialisation semble avoir légèrement diminué puisqu'elle était de +5400 ha/an entre 2006 et 2010.

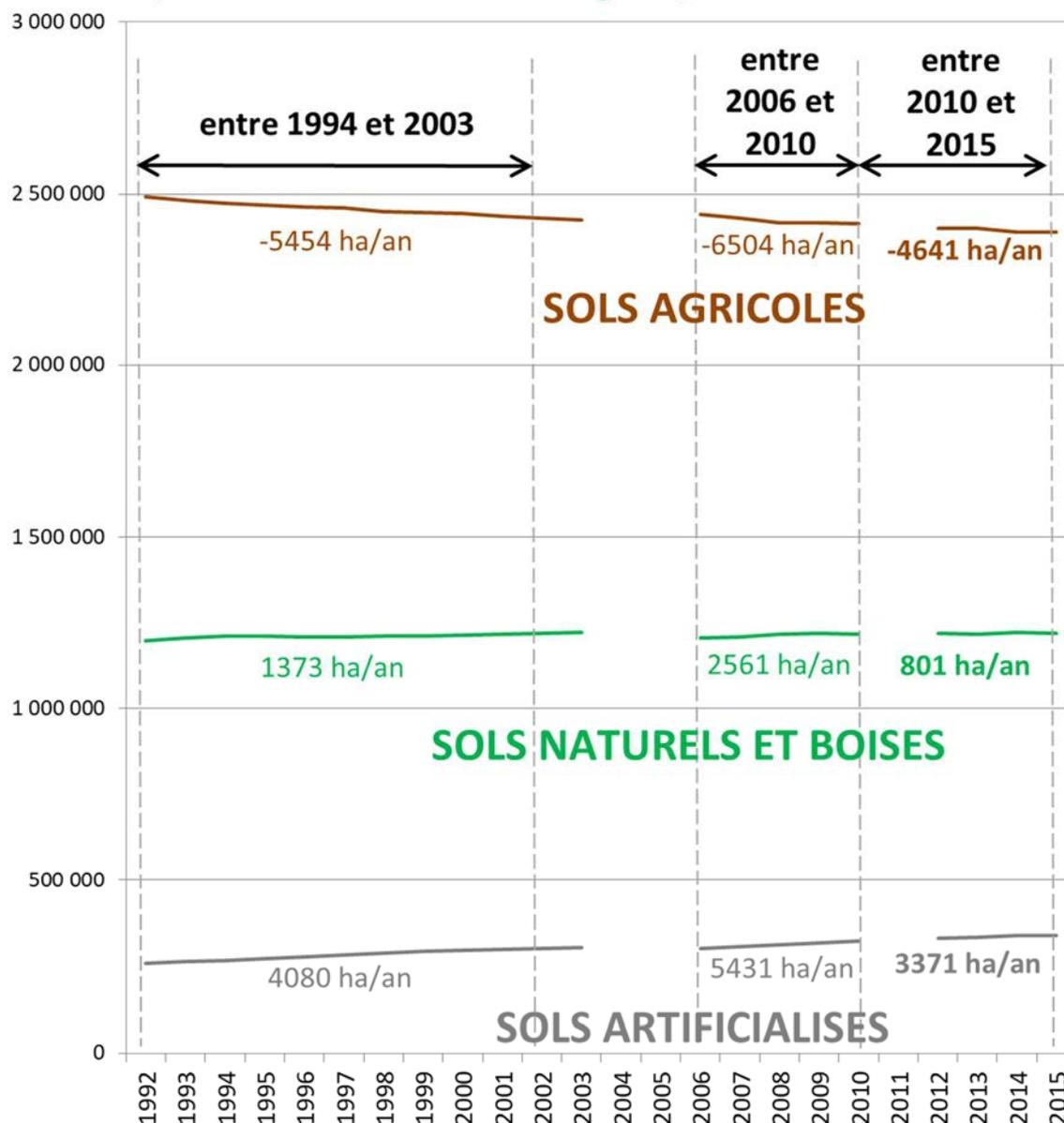
Quant à la surface des espaces naturels et boisés, elle est en légère progression de l'ordre de 800 hectares/an (augmentation de la surface des friches et de la forêt).

5 ATTENUATIONS AGRICOLES



Observatoire Régional sur l'Agriculture et le Changement climatique

E1-Occupation du sol et matière organique des sols



Evolution des sols agricoles, naturels et boisés, artificialisés en région Centre Val-de-Loire depuis 1992 Source : SSP - Agreste - Enquête Teruti 1992-2003 et Teruti-Lucas 2006 -2015 *

* A noter que l'enquête Teruti-Lucas en 2006 a entraîné une rupture de série par rapport à l'enquête Teruti de 2003 à cause d'un changement de méthodologie.

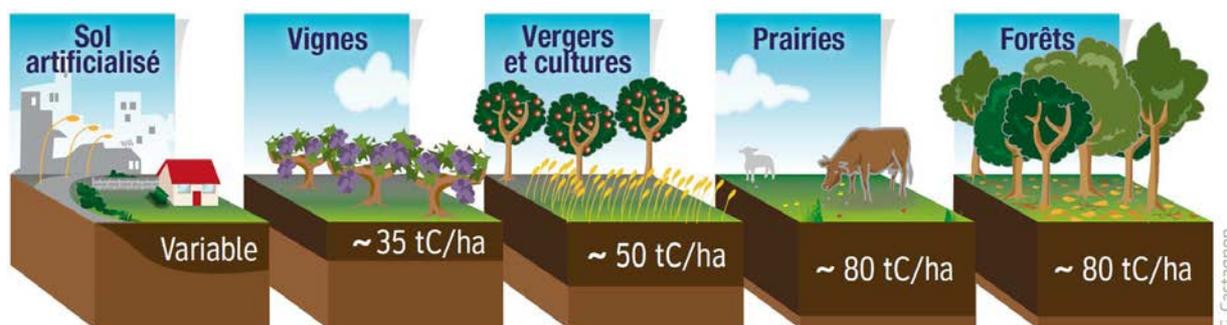
5 ATTENUATIONS AGRICOLES



Observatoire Régional sur l'Agriculture et le Changement climatique

E1-Occupation du sol et matière organique des sols

En France métropolitaine, les stocks de carbone organique dans la couche superficielle des sols (0-30 cm) sont évalués à environ 3,2 milliards de tonnes (source Gis Sol). Ce carbone organique provient de la décomposition des végétaux ou d'effluents d'élevage. Cette décomposition (qui émet du CO₂) va dépendre des conditions du milieu (aération, humidité, localisation de la matière organique dans le sol, température...), des pratiques agricoles (labour, gestion des couverts et des résidus de récolte...), et de l'occupation du sol. Ainsi, le stock de matière organique (ADEME, 2014) est en moyenne élevé dans les forêts et les prairies (environ 80 tC/ha), moyen dans les vergers et cultures (50 tC/ha) et faible en viticulture (35 tC/ha). Les stocks sont difficilement quantifiables en zone urbaine, mais dans le cas où ils sont imperméabilisés, ils ne pourront plus avoir d'action stockante.



Estimation du stock de carbone* dans les 30 premiers centimètres du sol – Source GIS sol

*Equivalence : 1 kg de C \Leftrightarrow 0,58 kg de matière organique \Leftrightarrow 3,6 kg CO₂

Ces variations de stocks de carbone des sols peuvent donc constituer un puits ou une émission de CO₂ sous l'effet de changements d'occupation des sols. Par exemple, un retournement de prairies pour faire des cultures va émettre du CO₂ alors que la mise en place d'une haie dans une parcelle agricole va stocker du carbone dans les sols.



E1-Occupation du sol et matière organique des sols



A retenir

Depuis 2010, les terres agricoles de la région Centre Val-de-Loire ont été grignotées (-4600 ha/an) principalement par les sols artificialisés (+3400 ha/an) et dans une moindre mesure par les sols naturels et boisés (+800 ha/an), ce qui impacte la variation de stocks de carbone dans les sols.

Les sols agricoles ont une capacité à stocker du carbone (en augmentant le taux de matière organique), alors que les sols artificialisés perdent cette capacité (sans parler d'autres bienfaits : biodiversité, infiltration de l'eau...).

La priorité est de contenir cette artificialisation sachant que la stratégie nationale bas carbone (SNBC) vise une « zéro artificialisation nette » en 2050.



Pour en savoir plus

- ADEME, 2014- Carbone organique des sols : L'énergie de l'agro-écologie, une solution pour le climat ;
- DRAAF, 2017- L'essentiel sur l'occupation et l'utilisation des terres en région Centre-Val de Loire
- Gis Sol - <https://www.gissol.fr/thematiques/matieres-organiques-des-sols-42>, consulté le 22/02/2020



E2-Les émissions agricoles de gaz à effet de serre et le stockage carbone



Indicateur 1

Evolution des émissions de gaz à effet de serre (GES) et du stockage carbone en région Centre Val-de-Loire par grands secteurs depuis 2008



Nature et source des données

Données fournies par l'OREGES (Observatoire Régional de l'Energie et des Gaz à Effet de Serre en région Centre-Val de Loire)



Calcul de l'indicateur

Les émissions de gaz à effet de serre sont exprimées en CO₂e (équivalent CO₂), et vont agréger tous les types de GES (CO₂, CH₄, N₂O...) émis par l'homme, en prenant en compte leur pouvoir de réchauffement global (PRG CO₂=1, PRG CH₄=28, PRG N₂O=265 ; ce qui signifie que sur un horizon de 100 ans, le CH₄ aura un impact vingt-huit fois plus important sur le réchauffement climatique que du CO₂ (et 265 fois pour le N₂O). Ces valeurs sont issues du 5ème rapport d'évaluation du GIEC (2013).

A l'inverse, la biomasse et la matière organique des sols peuvent stocker durablement le carbone. Ce stockage carbone est exprimé en CO₂e, dans la même unité que les émissions de GES. Par la suite, cette séquestration carbone, représentée par le secteur UTCATF, sera représentée comme des émissions de GES négatives.

Les 7 grands secteurs traités sont les suivants :

- **UTCATF** : Utilisation des Terres, Changements d'Affectation des Terres et Foresterie. Ce secteur comptabilise les variations de flux de carbone (biomasse et matière organique des sols) au cours d'une année. Les flux principaux sont dus aux changements d'affectation des terres (ex : terres agricoles converties en terres urbanisées ou en forêt), à des changements de pratiques (ex : cultures intermédiaires) ou à des dynamiques de long terme (ex : croissance forestière). Dans le cas où ces flux de carbone sont positifs sur un territoire, cela contribue à la séquestration (ou au stockage) du carbone. A l'inverse des pratiques agricoles « déstockantes » ou des incendies de forêt peuvent déstocker du carbone d'un territoire.
- **agriculture** : principalement les émissions associées à l'élevage (fermentation entérique des ruminants, fermentation des déjections animales...), aux cultures (fertilisation azotée des cultures, travail du sol...) et aux machines agricoles et sylvicoles.
- **transport** : regroupe le transport routier (voitures, poids lourds, bus et deux roues) et non routiers (aérien, fluvial, maritime et ferroviaire)
- **industrie** : tous les domaines sont concernés : chimie, construction, agro-alimentaire, métallurgie, fabrication du papier...
- **résidentiel et tertiaire** : Les émissions proviennent principalement des appareils de chauffage et de climatisation pour les activités domestiques (résidentiel) et pour les bâtiments des commerces, institutions et services publics (tertiaire)
- **autres** : principalement le secteur des déchets (qui émettent des GES selon leur filière d'élimination : installation de stockage de déchets (ISD), par incinération, par recyclage organique ou par recyclage matière) et le secteur de l'énergie mais uniquement l'extraction et la distribution de l'énergie (par exemple, le stockage de combustibles gazeux...).

A noter que les émissions de GES liées à la production d'électricité et de chaleur sont comptabilisées au niveau des secteurs utilisateurs (résidentiel et tertiaire, industrie...).

5 ATTENUATIONS AGRICOLES



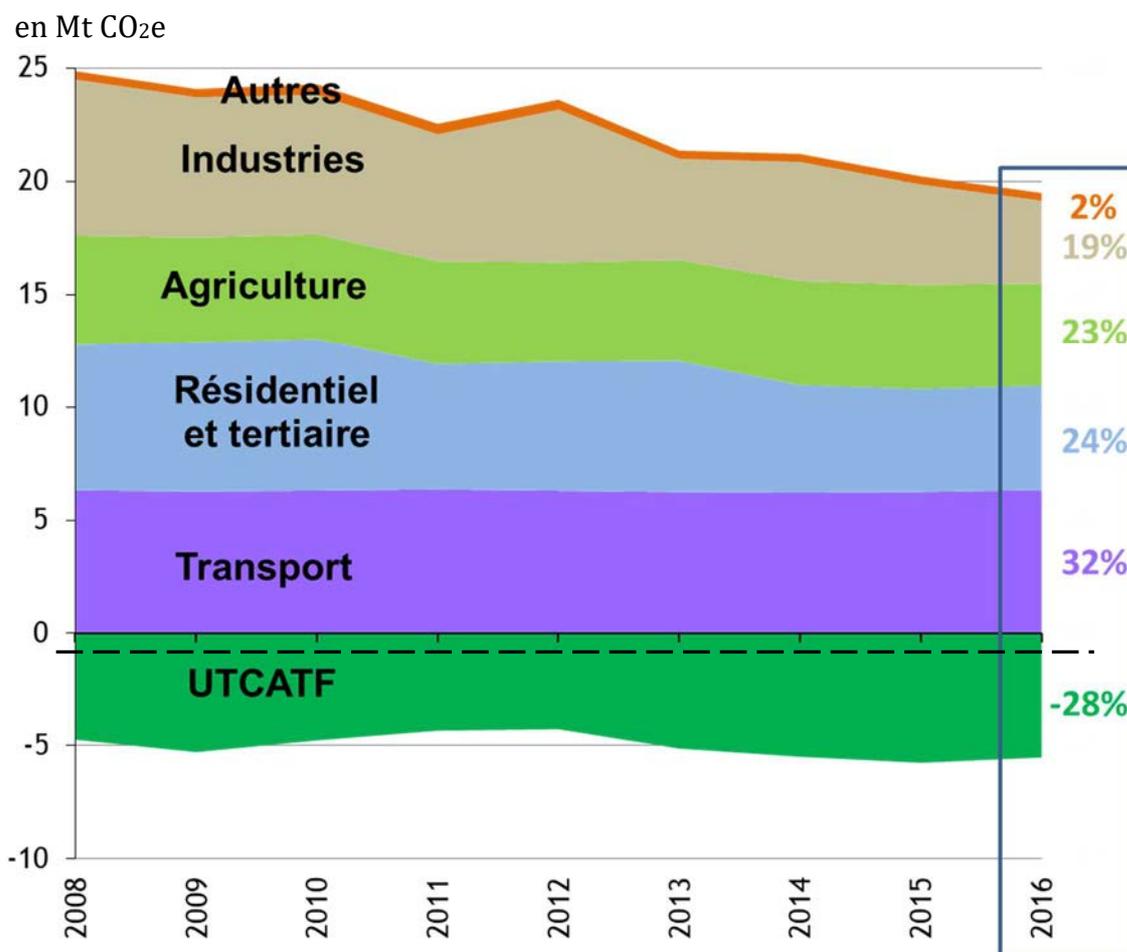
Observatoire Régional sur l'Agriculture et le Changement cLimatiquE

E2-Les émissions agricoles de gaz à effet de serre et le stockage carbone



Évolution observée

- **en abscisse** : années
- **en ordonnée** : émissions en millions de tonnes équivalent CO₂ (Mt CO₂e)



Evolution des émissions de gaz à effet de serre et de stockage carbone en millions de tonne équivalent CO₂ en région Centre Val-de-Loire depuis 2008 - source OREGES



E2-Les émissions agricoles de gaz à effet de serre et le stockage carbone



Analyse

Les émissions 2016 de gaz à effet de serre (hors secteur UTCATF) sont :

- de **19,5 Mt CO₂e en 2016** en région Centre Val-de-Loire et ont baissé de 21,6% de 2008 à 2016
- de 448 Mt CO₂e en 2016 en France métropolitaine et ont baissé de 12,8% de 2008 à 2016 (CITEPA)

Le secteur le plus émetteur est celui du transport (32%), suivi du résidentiel et tertiaire (24%), de l'agriculture (23 %), et de l'industrie (19%). A noter que le secteur UTCATF concerne indirectement le secteur agricole puisqu'il regroupe les flux de carbone induits par les activités humaines, relatifs au couvert végétal (prairies, haies, forêt...) et à la matière organique du sol.

De 2008 à 2016, les secteurs qui ont connu les plus fortes baisses sont le secteur industriel (-47 %), le secteur résidentiel-tertiaire (- 28%) et dans une moindre mesure, le secteur agricole (-7 %). Le secteur des transports n'a pas du tout évolué depuis 2008. A noter que les variations interannuelles s'expliquent principalement par la douceur (ou la rigueur) des hivers jouant sur les émissions de CO₂ dans les secteurs ayant besoin de chaleur (résidentiel-tertiaire et industrie).

La Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC) définit une trajectoire de réduction des émissions de GES compatible avec l'Accord de Paris. Cet accord ambitionne de limiter la hausse des températures moyennes mondiales à +2°C à la fin du XXI^{ème} siècle. Pour atteindre cet objectif, la France doit atteindre la neutralité carbone au cours de la 2^{ème} moitié du 21^{ème} siècle. C'est-à-dire parvenir à un équilibre entre les émissions anthropiques de GES et les absorptions par les puits de carbone dès 2050. Actuellement, le stockage carbone ne compense que 28% les émissions régionales (8% au niveau national). A terme, l'objectif est d'amener cette compensation à 100 % en 2050. Etant donné le potentiel limité des puits de carbone dans le sol et dans la biomasse forestière, cet objectif implique nécessairement une réduction massive des émissions dans tous les secteurs.

5 ATTENUATIONS AGRICOLES



Observatoire Régional sur l'Agriculture et le Changement climatique

E2-Les émissions agricoles de gaz à effet de serre et le stockage carbone

Indicateur 2

Emissions de gaz à effet de serre et stockage carbone par secteur et par département

Nature et source des données

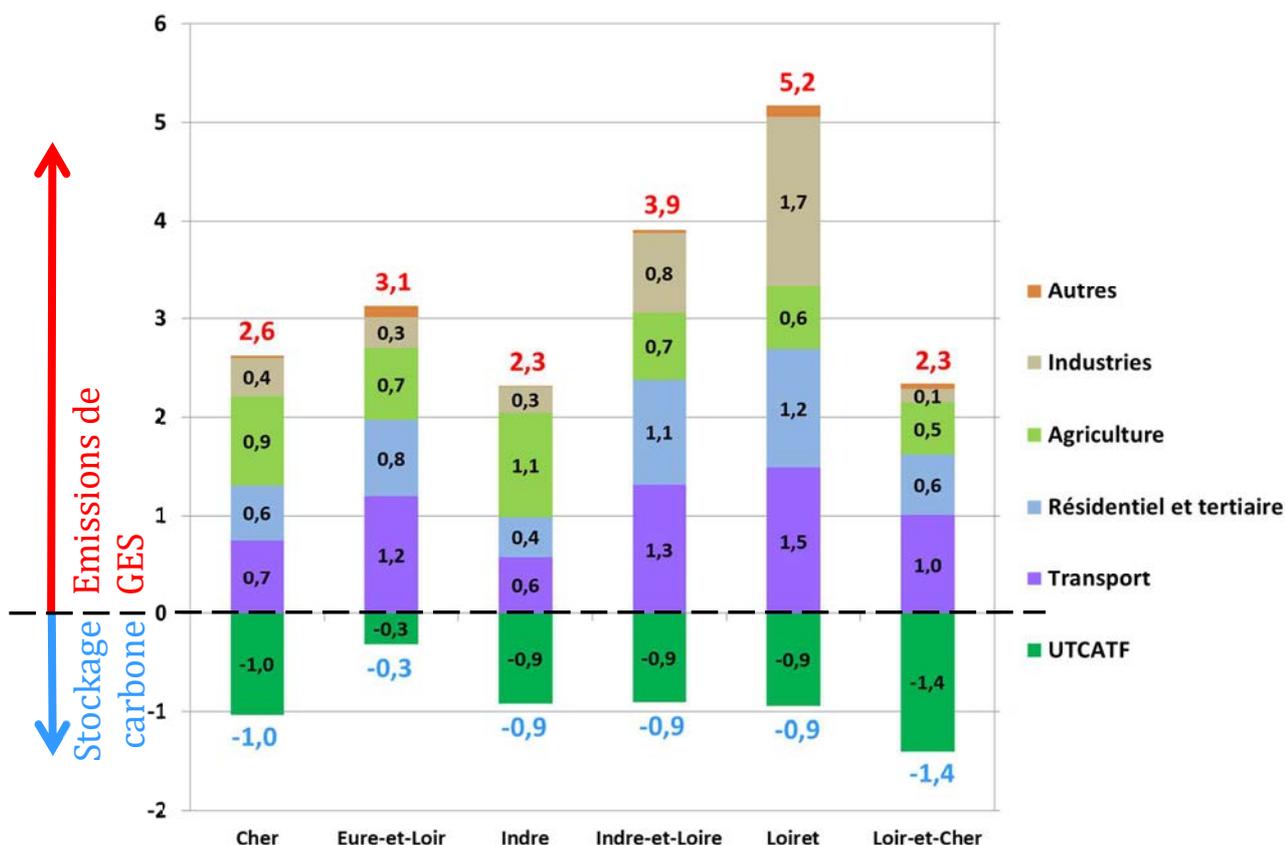
Données fournies par l'OREGES (Observatoire Régional de l'Énergie et des Gaz à Effet de Serre) Centre-Val de Loire pour l'année de référence 2016.

Calcul de l'indicateur

Emission de GES par secteur en millions de tonnes équivalent CO₂ (Mt CO₂e) par département

Résultat observée

- **en abscisse** : département
- **en ordonnée** : émissions en millions de tonnes équivalent CO₂



Emissions de gaz à effet de serre et stockage carbone en millions de tonne équivalent CO₂ par département en 2016 - source OREGES

5 ATTENUATIONS AGRICOLES



Observatoire Régional sur l'Agriculture et le Changement climatique

E2-Les émissions agricoles de gaz à effet de serre et le stockage carbone

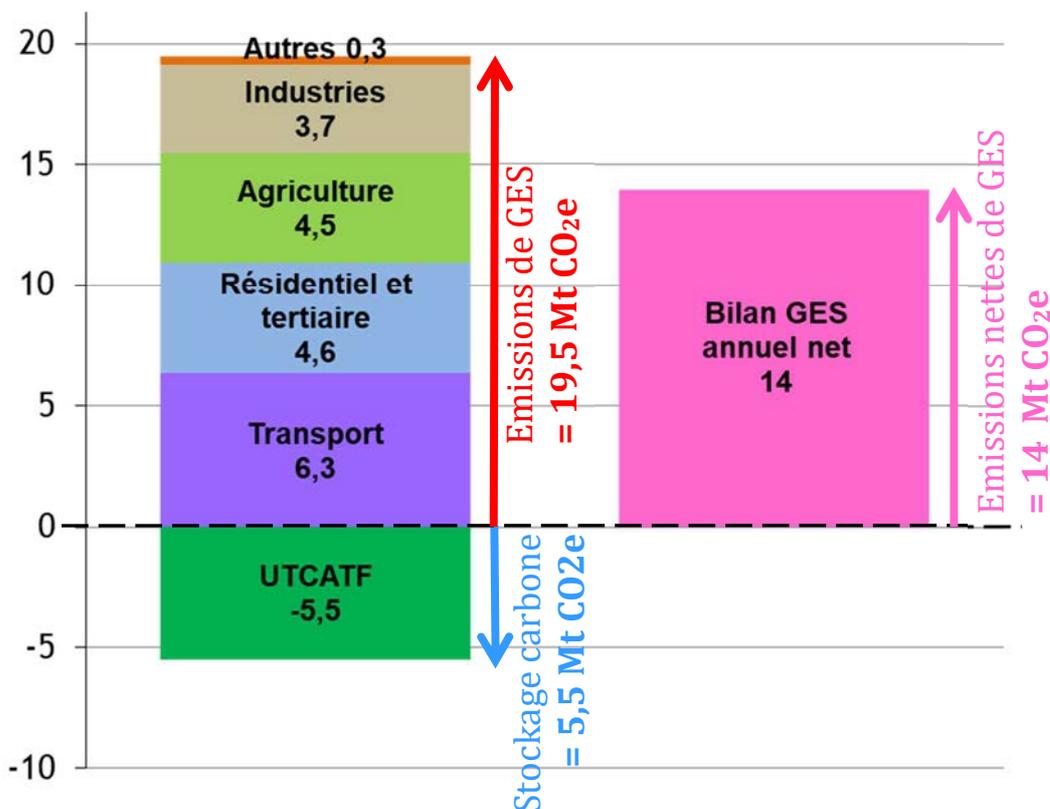


En région Centre Val-de-Loire, l'agriculture représente **23 %** des émissions de gaz à effet de serre en 2016, avec **4,5 Mt CO₂e** (source OREGES). Ce taux de 23 % est une moyenne puisqu'il varie fortement au niveau départemental ; en effet, la proportion des émissions agricoles varie de 12% (avec 0,6 Mt CO₂e dans le Loiret) à 46% (avec 1,1 Mt CO₂e dans l'Indre). Ce dernier pourcentage s'explique par le fait que l'Indre possède la SAU la plus importante de la région (20 %) mais surtout qu'il possède 37% du cheptel bovin régional.

Du côté du stockage carbone, on obtient **5,5 Mt CO₂e au niveau régional**. Ce taux varie de 6% (avec 0,3 Mt CO₂e dans l'Eure-et-Loir) à 25% (avec 1,4 Mt CO₂e dans le Loir-et-Cher). Ce dernier pourcentage s'explique par le fait que le Loir-et-Cher possède 24% de la surface forestière régionale.

En ajoutant le secteur UTCATF qui estime « la séquestration annuelle de carbone » (= émissions négatives) aux émissions de GES annuelles de tous les secteurs d'un territoire, on obtient un bilan annuel net de GES de **14 Mt CO₂e**. Le bilan GES annuel net régional annuel est fortement positif ce qui signifie que le territoire émet beaucoup plus de gaz à effet de serre qu'il n'en séquestre (voir graphique ci-dessous).

en Mt CO₂e



Bilan GES net (émissions – stockage) en millions de tonne équivalent CO₂ en région Centre Val-de-Loire en 2016 - source OREGES

5 ATTENUATIONS AGRICOLES



Observatoire Régional sur l'Agriculture et le Changement climatique

E2-Les émissions agricoles de gaz à effet de serre et le stockage carbone



Indicateur 3

Evolution des différents types de gaz à effet de serre émis par secteur agricole



Nature et source des données

Données fournies par l'OREGES (Observatoire Régional de l'Énergie et des Gaz à Effet de Serre) pour l'année de référence 2016, en région Centre-Val de Loire



Calcul de l'indicateur

Emission de GES agricoles par type de GES et par secteurs en millions de tonnes équivalent CO₂. Cette section ne concerne pas le secteur UTCATF.

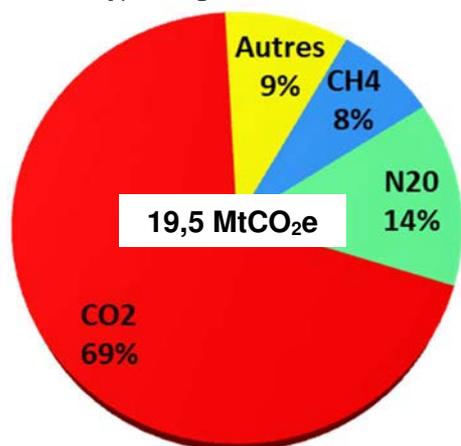


Résultat observée

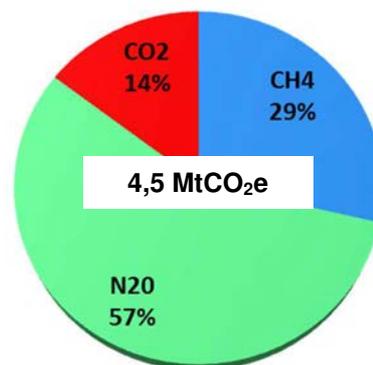
En région Centre, tous secteurs confondus, les émissions de GES (voir ci-dessous, à gauche) sont de 19,5 Mt CO₂e et sont émis sous différentes formes :

- à 69 % de CO₂ (dioxyde de carbone),
- à 14 % de N₂O (protoxyde d'azote),
- à 8 % de CH₄ (méthane)
- et à 9 % sous d'autres formes (fluorés...).

Type de gaz à effet de serre émis en région Centre Val-de-Loire en 2016 émis par :



tous les secteurs



le secteur agricole

Mais si on s'intéresse uniquement au secteur agricole en région Centre Val-de-Loire, soit 4,5 Mt CO₂e, ces répartitions sont complètement différentes (voir ci-dessus, à droite) :

- **14 % de CO₂** (dioxyde de carbone),
- **57 % de N₂O** (protoxyde d'azote),
- **29 % de CH₄** (méthane)

5 ATTENUATIONS AGRICOLES



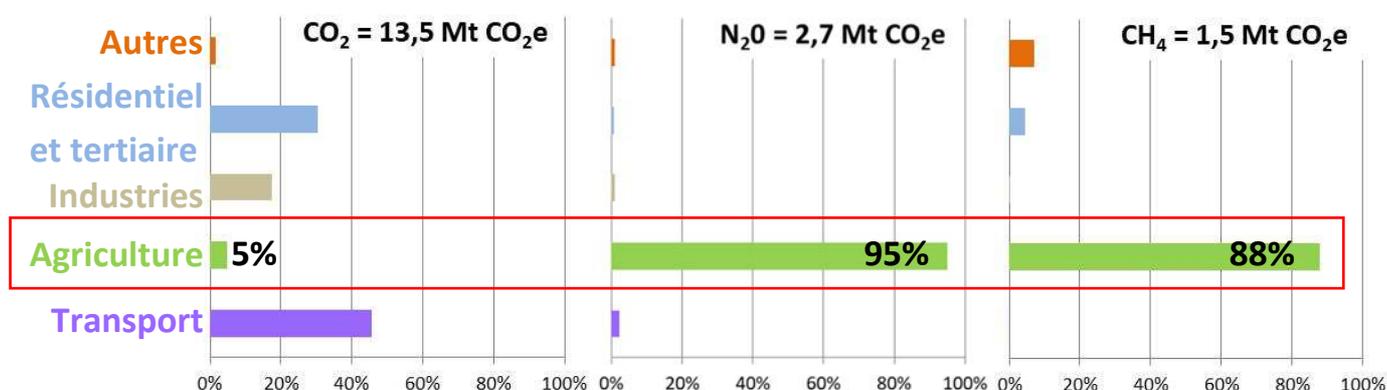
Observatoire Régional sur l'Agriculture et le Changement climatique

E2-Les émissions agricoles de gaz à effet de serre et le stockage carbone

Par rapport à la totalité des émissions de GES de la région Centre Val-de-Loire, les émissions agricoles représentent (voir graphique ci-dessous) :

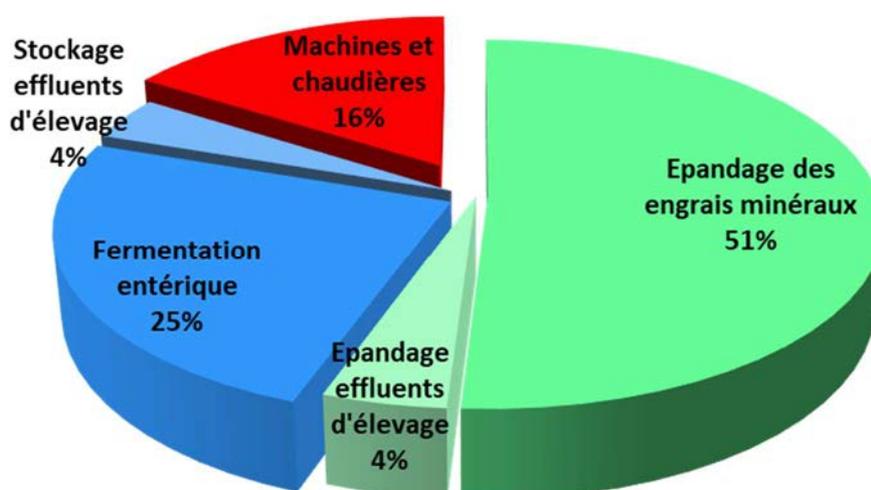
- 5 % du CO₂
- 95 % du N₂O
- 88 % du CH₄

Autrement dit, le méthane et le protoxyde d'azote sont des gaz à effet de serre principalement d'origine agricole.



Contribution des secteurs aux émissions de CO₂, N₂O, CH₄ – source OREGES

Au sein du secteur agricole, ces activités peuvent être associées à des types d'activités (voir graphique ci-dessous : en vert : protoxyde d'azote ; en bleu : méthane et en rouge : majoritairement du dioxyde de carbone).



Emission de gaz à effet de serre agricole en fonction des types d'activités en 2016 – source OREGES

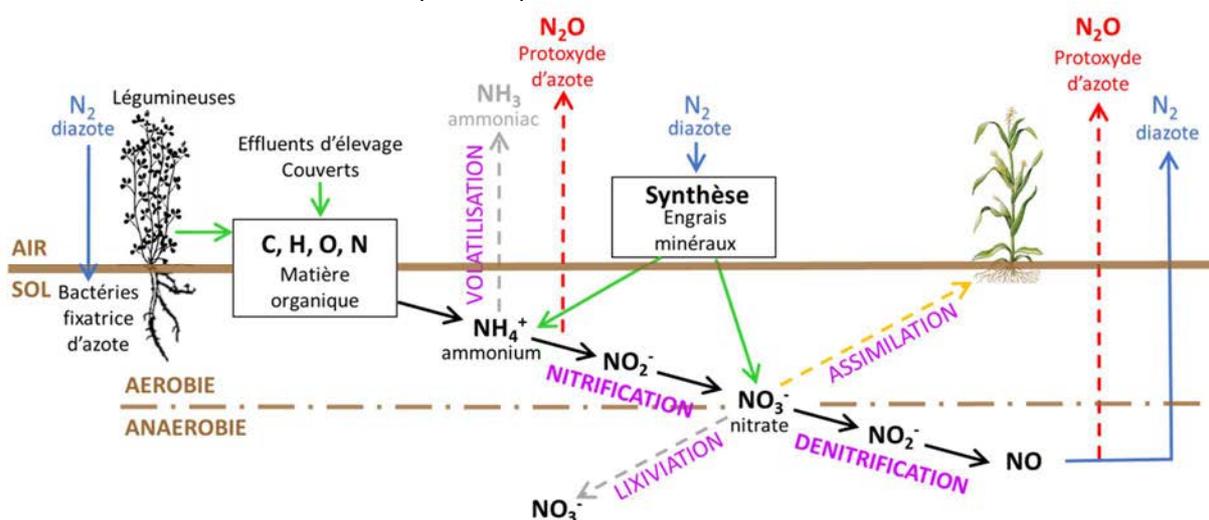
5 ATTENUATIONS AGRICOLES

Observatoire Régional sur l'Agriculture et le Changement climatique

E2-Les émissions agricoles de gaz à effet de serre et le stockage carbone

En région Centre Val-de-Loire, les émissions agricoles sont donc principalement impactées par :

- Le **protoxyde d'azote** : ces émissions sont principalement liées aux **cultures**, en particulier du fait de l'épandage de fertilisants azotés minéraux (**51%**) et organiques (**4%**). Les émissions de N_2O sont produites principalement lors des réactions de **nitrification-dénitrification** (réaction faisant parti du cycle de l'azote), par les micro-organismes présents dans le sol. Les émissions de protoxyde d'azote vont évoluer en fonction des conditions pédoclimatiques (sol hydromorphe/sol bien drainé) et des pratiques culturales (non labour/labour), notamment à cause de la disponibilité en oxygène dans le sol. D'autres émissions, dites « indirectes », ont également lieu, soit après **lixiviation** du NO_3^- dans le sol puis dénitrification ; soit après **volatilisation** de NH_3 , redéposition puis nitrification/dénitrification.



Source de production du protoxyde d'azote (N_2O) dans le sol

- Le **méthane** : Les émissions de CH_4 sont principalement liées à l'**élevage** car ces émissions ont lieu en milieu anaérobie (c'est-à-dire en l'absence d'oxygène), lors de la dégradation des matières organiques par les microorganismes. Chez les ruminants (bovins à 89%, caprins à 5%, ovins à 5%...), la dégradation des glucides par les microorganismes du rumen produit du CH_4 , évacué principalement par éructation. Cette fermentation entérique des ruminants représente **25%** des émissions agricoles de la région. Lors du stockage des effluents en conditions anaérobies (fosse à lisier, caillebotis ou tas de fumier), la matière organique contenue dans les déjections des animaux donne aussi lieu à des émissions de CH_4 (**4%**).
- Le **dioxyde de carbone** (à 14 %) : Les émissions de CO_2 sont émises principalement par les **engins agricoles**, par des chaudières (ex : serres chauffées), ou par des climatiseurs (ex : chais viticoles), etc... L'émission de CO_2 est principalement émise par la combustion de carburant, mais n'est pas une source importante (**16%**) comparé aux autres secteurs. En effet, l'agriculture régionale ne consomme que 4 % de l'énergie finale par rapport à la totalité des secteurs (source Lig'Air).

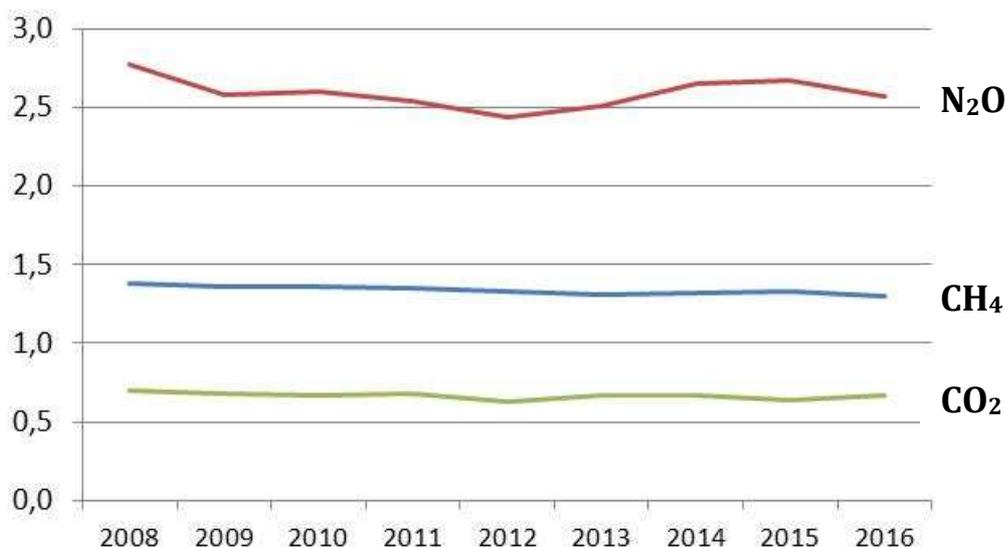
5 ATTENUATIONS AGRICOLES



Observatoire Régional sur l'Agriculture et le Changement climatique

E2-Les émissions agricoles de gaz à effet de serre et le stockage carbone

On constate que les émissions agricoles, par rapport aux autres secteurs, sont majoritairement d'origine non énergétique et contrôlées plutôt par des processus biologiques : méthane (CH₄) des ruminants et protoxyde d'azote (N₂O) des micro-organismes des sols ce qui les rend plus complexes à maîtriser.



Evolution des différents types de gaz à effet de serre émis par secteur agricole depuis 2008 en Région Centre Val-de-Loire - source OREGES

Tous secteurs confondus, les émissions de gaz à effet de serre ont baissé de 21,6% de 2008 à 2016. Concernant l'agriculture, ils ont baissé seulement de 6,6 % entre 2008 et 2016 (de 4,9 à 4,5 Mt CO₂e). Seul le méthane, a baissé avec une tendance significative mais cela s'explique en partie par la diminution du cheptel bovin de 3% entre 2008 et 2016.

5 ATTENUATIONS AGRICOLES



Observatoire Régional sur l'Agriculture et le Changement climatique

E2-Les émissions agricoles de gaz à effet de serre et le stockage carbone



Indicateur 4

Evolution du stockage carbone (secteur UTCATF) en région Centre Val-de-Loire depuis 2008



Nature et source des données

Données fournies par l'OREGES (Observatoire Régional de l'Energie et des Gaz à Effet de Serre en région Centre-Val de Loire)



Calcul de l'indicateur

Le secteur UTCATF (Utilisation des Terres, Changements d'Affectation des Terres et Foresterie) consiste à comptabiliser les variations de flux de carbone (biomasse et matière organique des sols) au cours d'une année. On retrouve du carbone organique dans 2 compartiments distincts :

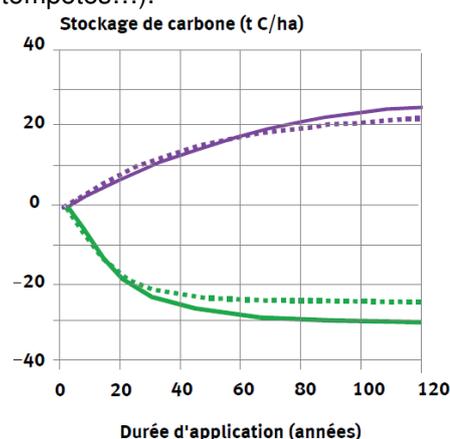
- **la biomasse aérienne à cycle long** (croissance des arbres, bois mort et litière)
- **la biomasse organique des sols** (racines, matière organique...).

Concernant **la biomasse aérienne à cycle long**, on notera qu'il n'est pas pris en compte la biomasse à cycle court ; c'est à dire, toutes les productions agricoles annuelles (grains, fourrages...) pourtant issus de la photosynthèse car elles font parties d'un cycle court du carbone (réémission du carbone dans l'atmosphère à très court terme). En effet, lorsqu'un blé croît, il capte du carbone atmosphérique pour constituer sa propre biomasse. Mais, le carbone sera libéré rapidement par consommation du grain par les animaux ou les hommes et décomposition de la paille dans les sols. Par contre, des pratiques agricoles « stockantes » (ex : développement des intercultures) ou « déstockante » (ex : exportation des pailles systématique sans restitution) qui feront évoluer le taux de matière organique des sols à long terme pourront être pris en compte dans ce secteur.

Pour la biomasse de cycle long, comme le bois, la situation est différente car il peut y avoir un écart important entre les quantités de carbone capté par des surfaces boisées (accroissement forestier) et les quantités de carbone émises (mortalité des arbres, incendies, tempêtes...).

On considère ici la récolte du bois comme une émission de CO₂ vers l'atmosphère. Cette émission peut être instantanée dans le cas du bois énergie ou retardée (mais non annulée) dans le cas du bois d'œuvre. Par simplicité, ces émissions n'ont pas été affectées à chaque consommateur ou secteur. Par exemple, lorsque du bois est brûlé pour un usage énergétique dans une industrie, l'émission de CO₂ associée n'est pas comptabilisée pour éviter un double comptage. Par contre, si cette industrie a baissé sa consommation d'énergie fossile grâce au bois énergie, alors ces économies de GES seront prises en compte au niveau de cette industrie. Idem pour le bois matériau (ex : bois construction) en remplacement de matériaux déstockant fortement du carbone (ex : ciment).

Concernant **la biomasse organique des sols**, en fonction des caractéristiques initiales du sol (teneur en matière organique, en argile, en calcaire, etc...), de son activité biologique et des pratiques culturales (fertilisation, labour, etc...), le carbone peut s'accumuler (= augmentation du taux de matière organique) ou être déstocké sous forme de CO₂. Le sol est donc à la fois un « puits » ou une « source » de carbone.



— Culture → forêt — Forêt → culture
... Culture → prairie ... Prairie → culture

Evolutions du stock de carbone dans le sol en fonction des usages – incertitudes +/- 40 % (source : Arrouays et al. 2002)

5 ATTENUATIONS AGRICOLES



Observatoire Régional sur l'Agriculture et le Changement climatique

E2-Les émissions agricoles de gaz à effet de serre et le stockage carbone

Par exemple, la conversion d'une prairie en culture, du simple fait du travail du sol va accroître la minéralisation par aération du sol et engendrer un déstockage de carbone deux fois plus rapide et deux fois plus important durant les 20 premières années que le stockage induit par la conversion inverse (voir schéma ci-contre).

Pour faciliter les comparaisons par rapport aux émissions de GES, le stockage carbone est traduit en CO₂équivalent, selon l'équivalence :

$$1 \text{ kg de C} \Leftrightarrow 0,58 \text{ kg de matière organique} \Leftrightarrow 3,6 \text{ kg CO}_2\text{e}$$

Évolution observée

- **en abscisse** : années
- **en ordonnée** : stockage ou émissions en millions de tonnes équivalent CO₂ (Mt CO₂e)



Evolution du secteur UTCATF en millions de tonne équivalent CO₂ en région Centre Val-de-Loire depuis 2008 - source OREGES

La récolte de bois augmente de 0,6 Mt CO₂e par décennie (NS ; p=0,06), compté ici comme une émission alors que l'accroissement forestier net augmente de 1,1 Mt CO₂e par décennie (p<0,05), compté comme un stockage carbone.

5 ATTENUATIONS AGRICOLES



Observatoire Régional sur l'Agriculture et le Changement climatique

E2-Les émissions agricoles de gaz à effet de serre et le stockage carbone



Avant toute chose, le secteur UTCATF (Utilisation des Terres, Changements d'Affectation des Terres et Foresterie) présente de fortes incertitudes et l'interprétation de son évolution interannuelle doit se faire avec prudence.

- Concernant l'Utilisation des Terres, il concerne notamment l'évolution du taux de matière organique des sols (voir indicateur « occupation des sols »). Ces mécanismes étant très lent et encore mal connus, leur évolution est jugée négligeable à l'échelle d'un flux annuel sur un territoire.
- Concernant le Changement d'Affectation des Terres. Il s'agit du bilan des flux entre les différentes occupations du sol : notamment forêt – pâture – culture (voir indicateur « occupation des sols ») auquel on applique les coefficients ci-dessous.

Conversion de terres	Flux additionnel annuel moyen en t C/ha/an (scénario à 20 ans)	Équivalences en CO ₂ émis ou capté (t eq. CO ₂ /ha/an) ¹⁰
	Stockage de carbone	Captage de CO ₂
Culture -> Prairie Permanente	0,49±0,26	0,84 à 2,75
Culture -> Boisement	0,44±0,24	0,73 à 2,49
Prairie permanente -> Boisement	inférieur à +0,1 ± 0,2	-0,1 à 0,3
	Déstockage de carbone	Émissions de CO ₂
Prairie permanente -> Culture	-0,95 ± 0,3	2,4 à 4,6
Bois -> Culture	-0,75	2,75
Bois -> Prairie permanente	-0,1±0,1	0 à 0,7

Estimation des impacts de changement d'affectation des terres sur le stockage de carbone dans les sols (source Arrouays et al., 2002)

En Région Centre Val-de-Loire, ce serait le défrichement (perte de forêt pour une autre utilisation) qui serait le facteur d'émission principale, mais ces chiffres demandent à être consolidés.

- Concernant la Foresterie, les données régionales disponibles permettent de distinguer :
 - L'accroissement net de la forêt, c'est-à-dire la croissance des arbres (5,9 m³/ha/an), ôté de la mortalité (0,6 m³/ha/an).
 - La récolte de bois (2,5 m³/ha/an), est comptée ici comme une émission de carbone (approche production) mais aurait pu être attribuée à chaque secteur consommateur (approche consommation) (voir explication ci-dessus).

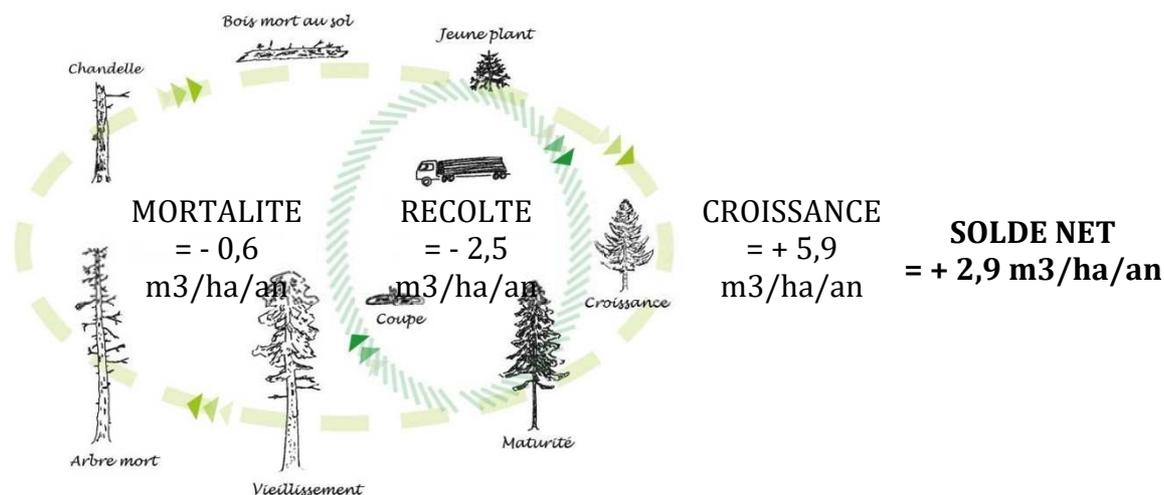
5 ATTENUATIONS AGRICOLES



Observatoire Régional sur l'Agriculture et le Changement climatique

E2-Les émissions agricoles de gaz à effet de serre et le stockage carbone

Pour information, la récolte de bois régionale était de 2 millions de m³ en 2016. D'après ces équivalences approximatives (1 m³ de bois = 0,5 t de bois sec = 0,25 tonne de carbone), on trouve 2 millions de tonnes équivalent CO₂ (du graphique ci-dessus).



Bilan des flux forestiers annuels en Région Centre Val-de-Loire sur la période 2006-2014 (source chiffres : inventaire forestier de l'IGN ; source schéma : <http://foretspreservees.com>)

En Région Centre Val-de-Loire, le solde de flux de la biomasse forestière aérienne est de 2,9 m³/ha/an (1,9 m³/ha/an au niveau national), soit un taux de prélèvement de 46 % (54 % au niveau national). Autrement dit, aujourd'hui, on récolte annuellement, la moitié de l'accroissement annuel de la forêt régionale.

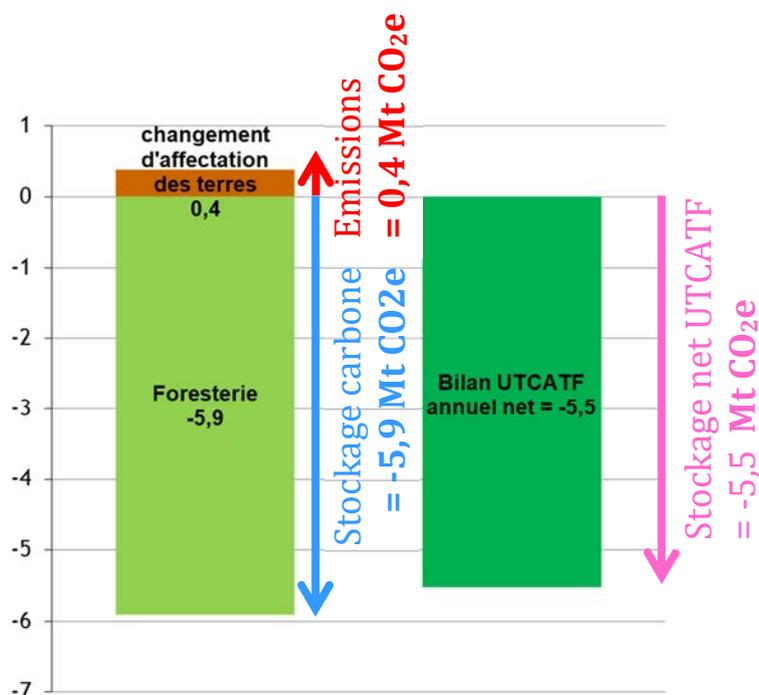
La façon de comptabiliser la récolte de bois (en émission de carbone) pourrait laisser penser que l'objectif est de diminuer ce poste pour augmenter le stockage carbone net. Ce n'est pas du tout le message qui doit s'en dégager puisque ce bois servira à éviter des gaz à effet de serre dans les autres secteurs consommateurs (bois énergie en remplacement d'énergie fossile, bois construction en remplacement du ciment, etc...). Cette stratégie de substitution (déstocker du carbone pour remplacer des énergies fossiles ou matériaux à fort contenu en carbone) n'est donc pas du tout à opposer (au contraire) à la stratégie de séquestration (accroissement forestier). En région, la forêt continue à séquestrer du carbone car la forêt régionale est jeune mais ne pas oublier qu'une forêt à l'équilibre ne stocke plus de carbone additionnel (dans une centaine d'années). De plus, le réchauffement climatique pourra augmenter les risques de déstockage carbone de la forêt en augmentant la mortalité, les incendies et les tempêtes. Ces deux stratégies forestières sont donc bien complémentaires (IFN).

5 ATTENUATIONS AGRICOLES



Observatoire Régional sur l'Agriculture et le Changement climatique

E2-Les émissions agricoles de gaz à effet de serre et le stockage carbone



Bilan net régional du secteur UTCATF en 2016 en millions de tonne équivalent CO₂ en région Centre Val-de-Loire en 2016 - source OREGES

En 2016, au niveau régional, le solde net est négatif, de l'ordre de - 5,5 millions de tonnes équivalent CO₂, le secteur UTCATF constitue donc un puits de carbone, mais loin de compenser les émissions de GES annuels de tous les autres secteurs (+19,5 MT CO₂e).

5 ATTENUATIONS AGRICOLES



Observatoire Régional sur l'Agriculture et le Changement climatique

E2-Les émissions agricoles de gaz à effet de serre et le stockage carbone



A retenir

- En région Centre Val-de-Loire, le secteur agricole représente 23 % des émissions de gaz à effet de serre derrière le transport routier (32%).
- En région Centre Val-de-Loire, les émissions agricoles de GES sont de 4,5 millions de tonnes d'équivalent CO₂ émis annuellement (référence 2016) sous la forme de protoxyde d'azote (57%), de méthane (29%) et de dioxyde de carbone (14%). L'épandage d'engrais minéraux représente plus de la moitié de ces émissions, la fermentation entérique des ruminants : un quart et l'utilisation des machines : plus de 15%.
- De 2008 à 2016, le secteur agricole a réduit ses émissions de GES de 6,6 %.
- En 2016, le secteur UTCATF, qui traduit l'évolution du stockage carbone en région constitue un « puits » de carbone de l'ordre de 5,5 Mt CO₂e principalement dû à l'accroissement de la forêt.
- En prenant en compte la séquestration du carbone, le bilan régional net de GES est de 14 Mt CO₂e en 2016. Pour répondre à l'objectif de neutralité carbone en 2050, il faudra nécessairement une réduction massive des émissions dans tous les secteurs y compris l'agriculture.



Pour en savoir plus

ADEME - <http://www.bilans-ges.ademe.fr>

Arrouays, D., J. Balesdent, J.C. Germon, P.A. Jayet, J.F. Soussana et P. Stengel (eds) (2002). Contribution à la lutte contre l'effet de serre. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? Expertise scientifique collective. Rapport. INRA. 332 pp.

CITEPA (Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique), 2017-
www.citepa.org

IF n°7 – La forêt française : un puits de carbone ? www.ifn.fr

INRA, 2013 - Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ?

Lig'Air (Association de surveillance de la qualité de l'air en région Centre-Val de Loire)
<https://www.ligair.fr/les-moyens-d-evaluation/inventaire-des-emissions-1/atlas-air-climat-energie-interactif>

OREGES (Observatoire Régional de l'Énergie et des Gaz à Effet de Serre) - <http://oreges-ligair.opendata.arcgis.com>

5 ATTENUATIONS AGRICOLES



Observatoire Régional sur l'Agriculture et le Changement climatique

E3-Livraisons des engrais minéraux azotés et volatilisation de l'azote

Indicateur 1

Evolution des livraisons d'engrais minéraux azotés entre 2002 et 2018 (en tonnes d'azote) dans la région Centre Val-de-Loire

Nature et source des données

Données fournies par l'UNIFA

Rappel

La teneur en azote des engrais est exprimée en kg d'azote. Ainsi, par exemple 150 kg d'ammonitrate par hectare dosant à 33,5 % d'azote, apportera 50 kg d'azote.

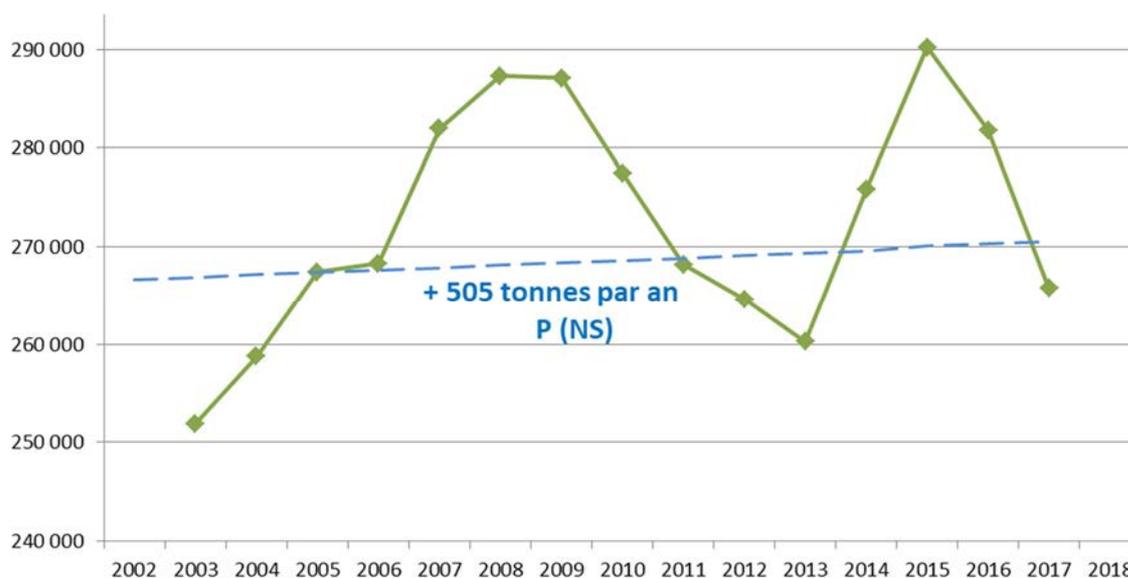
Calcul de l'indicateur

Evolution du total régional des livraisons des engrais minéraux azotés (courbe verte) exprimée en moyenne triennale, afin de lisser les variations de livraisons, qui peuvent être liées à l'écart de stocks (méthode retenue par le CITEPA au niveau national).

Évolution observée

- **en abscisse** : année
- **en ordonnée** : quantité en tonnes d'azote livrées

***Remarque :** L'année se réfère à la fin de la campagne agricole, par exemple l'année 2004 correspond à la campagne agricole 2003/2004.



Evolution des quantités d'engrais minéraux utilisés en région Centre Val-de-Loire (en moyenne triennale) – Source UNIFA

5 ATTENUATIONS AGRICOLES



Observatoire Régional sur l'Agriculture et le Changement climatique

E3-Livraisons des engrais minéraux azotés et volatilisation de l'azote



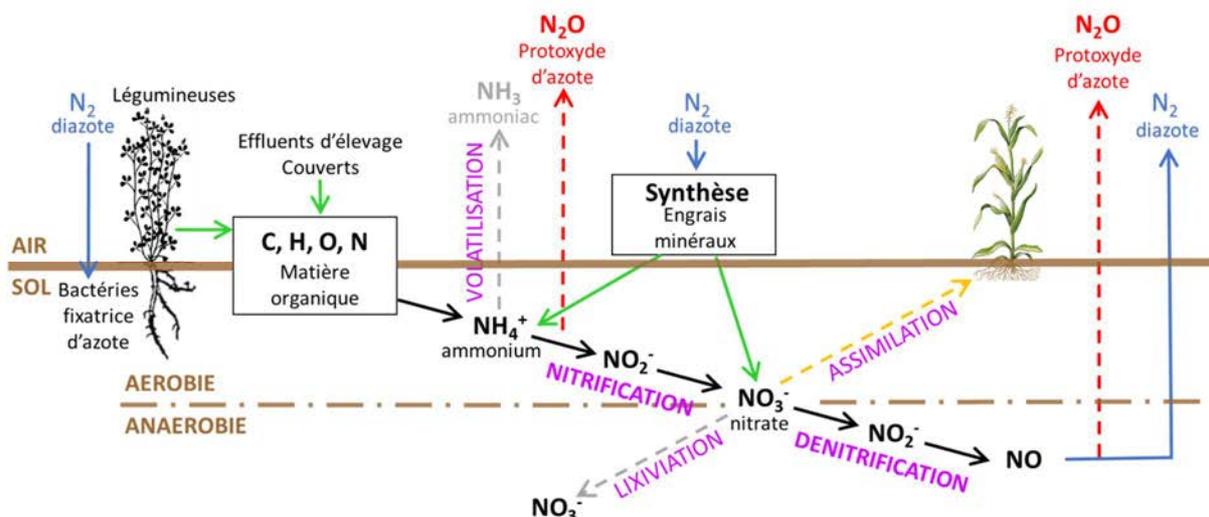
En région Centre Val-de-Loire, les émissions de gaz à effet de serre du secteur agricole représentent 23% des émissions totales (soit **19,5 Mt CO₂e**), derrière le secteur du transport (32%) (voir indicateur « émissions de gaz à effet de serre »). Ces émissions sont principalement dues au protoxyde d'azote (57%), au méthane (29%) produit lors de fermentations en conditions anaérobies (fermentation entérique et stockage des déjections) et au dioxyde de carbone (14%) lié principalement à la combustion d'énergies fossiles.

En 2017, le CITEPA estime que le poste « engrais et amendements minéraux » (12,4 Mt CO₂e) représente 14,5 % du secteur agricole (85,5 Mt CO₂e) au niveau national. Ce poste est dû à l'émission de deux types de GES :

- à 84 % au protoxyde d'azote (= 10,5 Mt CO₂e) lié aux émissions des micro-organismes du sol
- à 16 % au dioxyde de carbone (= 1,9 Mt CO₂e) lié à l'utilisation des machines servant à l'épandage des engrais minéraux.

A noter qu'il s'agit ici, uniquement des émissions directes des engrais minéraux, l'impact GES lors de leur fabrication (énergivore) n'est pas prise en compte ici. A titre d'exemple, la fabrication d'un kilogramme d'ammonitrate, le type d'engrais le plus utilisé en France, libère en moyenne 5,86 kg équivalent CO₂ (ADEME).

Les émissions de protoxyde d'azote (N₂O) sont produites principalement lors des réactions de nitrification-dénitrification de l'azote, par les bactéries présentes dans le sol (voir schéma ci-dessous). Mais l'origine de cet azote n'est pas uniquement minérale. En effet, à l'échelle nationale, si le poste « engrais et amendements minéraux » pèse 14,5 % des GES agricoles (voir ci-dessus), le poste organique (déjections apportées lors du pâturage + effluents d'élevages épandus) pèse 12,6 %.



Source de production du protoxyde d'azote (N₂O) dans le sol



E3-Livraisons des engrais minéraux azotés et volatilisation de l'azote

Dans la région Centre Val-de-Loire, la moyenne (2002-2018) des livraisons des engrais azotés est de l'ordre de 270 000 tonnes d'azote. L'étude de la tendance d'évolution montre une augmentation annuelle de l'ordre de 500 tonnes d'azote par an, mais non significative.

D'après l'INRA, les activités agricoles génèrent un excédent azoté estimé à 36 kg d'azote par hectare et par an au niveau national, soit un quart de la fertilisation azotée moyenne. De ce fait, une fertilisation azotée raisonnée et une amélioration de l'efficacité de l'azote apporté sont nécessaires pour réduire les émissions de gaz à effet de serre.

A l'échelle nationale, plusieurs actions ont été étudiées par l'INRA afin de diminuer les apports de fertilisants minéraux azotés (INRA, 2013) :

- Réduire la dose d'engrais en ajustant mieux l'objectif de rendement ;
- Mieux valoriser les apports organiques (meilleure prise en compte, enfouissement, augmenter le volume de biodéchets recyclés...) ;
- Améliorer les conditions d'apport de l'azote minéral (date d'apport, enfouissement, inhibiteurs de nitrification...)

L'ensemble de ces actions, représente un potentiel d'atténuation annuel estimé à 6 millions de tonnes d'équivalent CO₂ à l'horizon de 2030, soit à peu près 7,1% des émissions de GES du secteur agricole de 2017 (85,5 Mt CO₂e).

5 ATTENUATIONS AGRICOLES



Observatoire Régional sur l'Agriculture et le Changement climatique

E3-Livraisons des engrais minéraux azotés et volatilisation de l'azote



Indicateur 2

Evolution des livraisons azotées par type d'engrais (en tonnes d'azote)



Nature et source des données

Données fournies par l'UNIFA



Calcul de l'indicateur

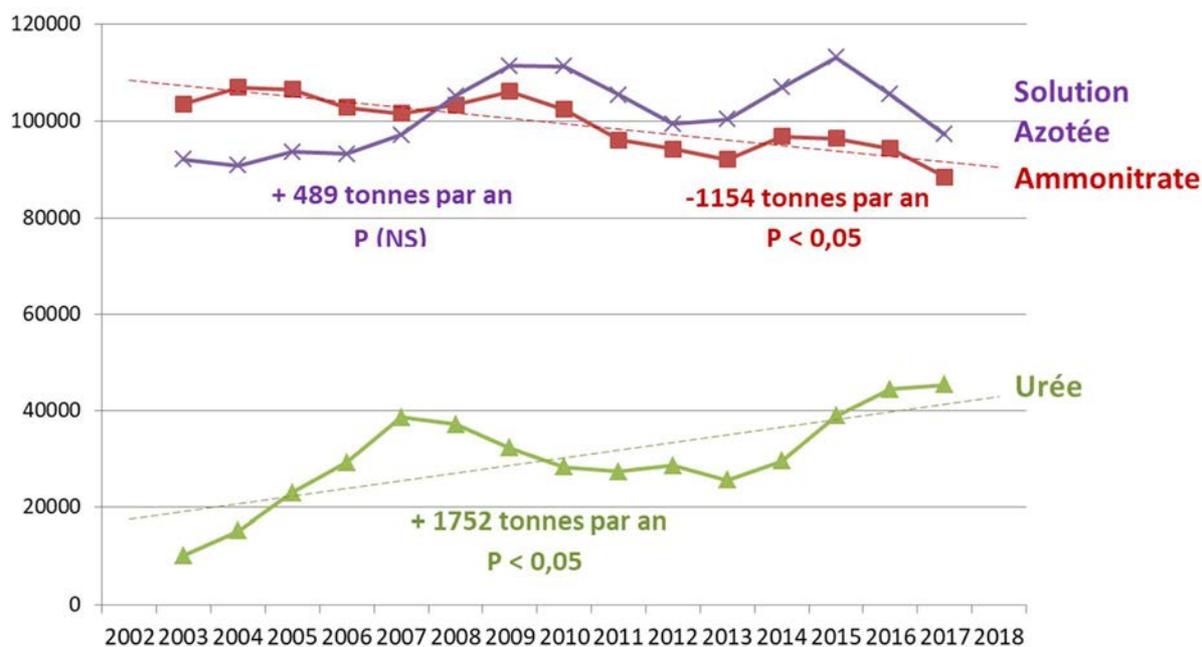
- Evolution des livraisons azotées par type d'engrais (courbes)
- Courbe de tendance dans la région Centre Val-de-Loire entre 2002 et 2018 (tirets)

***Remarque :** L'évolution des livraisons azotées par type d'engrais est exprimée par la moyenne triennale, afin de lisser les variations de livraisons, qui peut être liée à l'écart du stock (méthode retenue par le CITEPA au niveau national).



Évolution observée

- **en abscisse :** année
- **en ordonnée :** quantité d'azote en tonnes d'azote livrées



Evolution des livraisons azotées (en tonnes d'azote) par type d'engrais

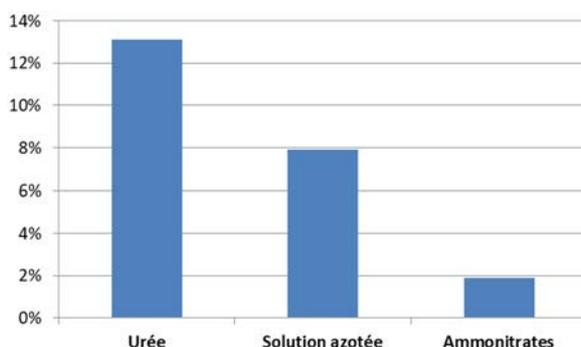


E3-Livraisons des engrais minéraux azotés et volatilisation de l'azote



Les principales formes d'engrais azotés utilisées sont : la solution azotée, l'ammonitrate et l'urée. Les moyennes des livraisons de ces formes d'engrais dans la région Centre Val-de-Loire, sont de 100 000 tonnes d'azote pour la solution azotée, 99 000 t pour l'ammonitrate et 29 000 t pour l'urée entre 2002 et 2018.

Sur le schéma précédent, une perte potentielle dans le cycle de l'azote est la volatilisation. En effet, l'ion ammonium, en solution (NH_4^+) dans le sol peut se volatiliser en NH_3 gazeux, en fonction des conditions pédoclimatiques. Le potentiel émissif en ammoniac NH_3 des engrais azotés est fortement lié à la forme d'engrais utilisée. Ainsi, les pertes moyennes par volatilisation pour les cultures annuelles sont estimées autour de 13% d'azote par rapport à l'azote apporté pour l'urée, 8% pour la solution azotée et de 2% pour les ammonitrates (voir schéma ci-dessous). Mais ce risque de volatilisation potentielle augmente d'autant plus que le temps est chaud, sec, et venteux.



Perte d'azote gazeuse sous forme d'ammoniac en fonction du type d'engrais

Source : Facteurs d'émission moyens utilisés dans l'inventaire national du CITEPA d'après les données EMEP 2016

Au niveau régional, la tendance d'évolution de l'utilisation des engrais uréiques entre 2002 et 2018 est en augmentation ces dernières années avec une quantité de 1800 tonnes d'azote par an pour l'urée et de 490 tonnes pour la solution azotée, alors que pour les ammonitrates, l'étude de la courbe de tendance durant la même période fait ressortir une baisse de 1150 tonnes d'azote par an. Cette tendance s'explique surtout par le coût de l'ammonitrate, qui est plus élevé que les autres engrais.

5 ATTENUATIONS AGRICOLES



Observatoire Régional sur l'Agriculture et le Changement climatique

E3-Livraisons des engrais minéraux azotés et volatilisation de l'azote

Indicateur 3

Evolution des émissions d'ammoniac en région Centre Val-de-Loire depuis 2008

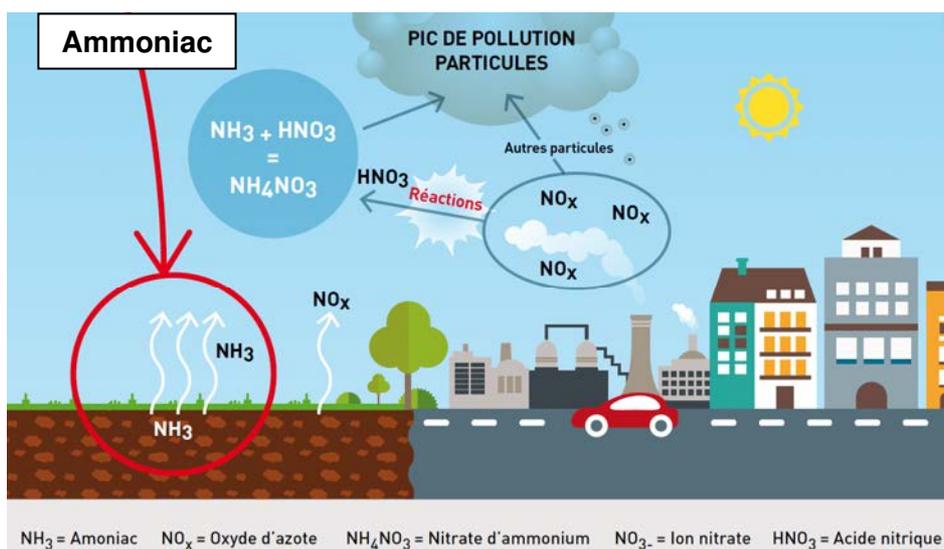
Nature et source des données

Données fournies par l'OREGES (Observatoire Régional de l'Energie et des Gaz à Effet de Serre en région Centre Val-de-Loire)

Calcul de l'indicateur

- Evolution des émissions de NH_3 entre 2008 et 2016, à l'échelle régionale

L'ammoniac (NH_3) n'est pas un gaz à effet de serre mais a un impact sur la santé et l'environnement car il est un précurseur de microparticules en s'associant avec les oxydes d'azote (voir schéma ci-dessous).



Conditions pour obtenir un pic de pollution printanier – source Chambre d'Agriculture

En région Centre Val-de-Loire, les émissions d'ammoniac du secteur agricole sont estimées en croisant des données d'activités (consommation d'énergie, recensement agricole, ...) avec des facteurs d'émissions propres à chaque polluant et à l'activité considérée.

5 ATTENUATIONS AGRICOLES



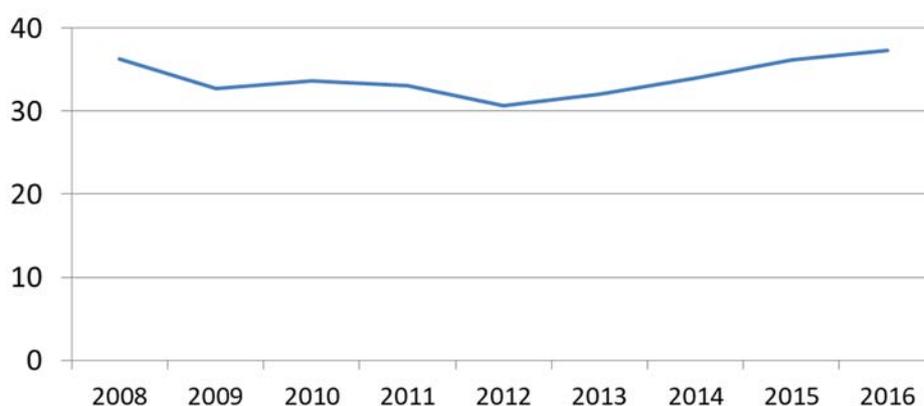
Observatoire Régional sur l'Agriculture et le Changement cLimatiquE

E3-Livraisons des engrais minéraux azotés et volatilisation de l'azote



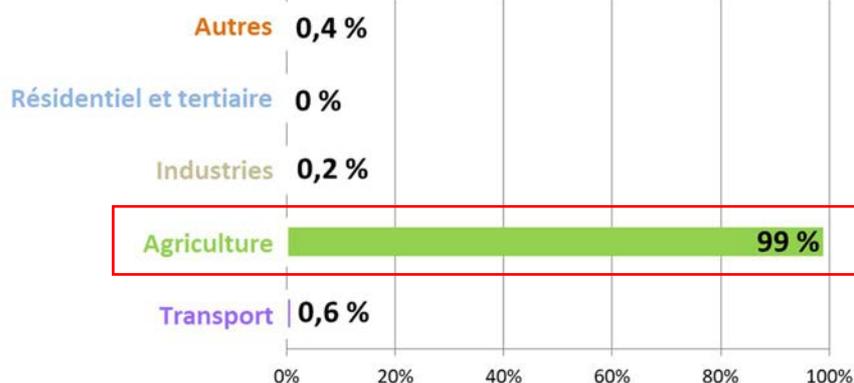
Évolution observée

- **en abscisse** : année
- **en ordonnée** : quantité d'ammoniac émis en milliers de tonnes



Evolution régionale des émissions d'ammoniac (milliers de tonnes) depuis 2008 - Source : Lig'Air

En 2016, la quantité d'ammoniac émise est de l'ordre de 37 800 tonnes, et n'a pas évolué depuis 2008. Les émissions agricoles représentent 99 % des émissions d'ammoniac (voir graphique ci-dessous). Les émissions agricoles de NH_3 proviennent de la volatilisation lors de l'épandage d'engrais minéraux (notamment l'urée), le stockage des effluents d'élevage et l'épandage des engrais organiques.



Contribution des secteurs aux émissions d'ammoniac (NH_3) - source Lig'Air

Plusieurs pratiques agricoles permettent de diminuer les émissions d'ammoniac notamment :

- Remplacement de l'urée ou la solution azotée par les ammonitrates (voir indicateur ci-dessus)
- Enfouissement rapide post épandage des engrais organiques et minéraux ;
- Utilisation des inhibiteurs d'uréase qui retardent le processus d'hydrolyse de l'urée, donc l'émission de NH_3 ;
- Eviter l'application des engrais uréiques dans les sols alcalins ou à faible capacité d'échange en cations (sols sableux).
- Couvrir les stockages d'effluents d'élevage.

Limiter les pertes gazeuses d'ammoniac permettra de limiter la dose initiale d'engrais (organique et/ou minérale) pour les plantes et donc de diminuer indirectement les émissions de GES agricoles.

5 ATTENUATIONS AGRICOLES



Observatoire Régional sur l'Agriculture et le Changement climatique

E3-Livraisons des engrais minéraux azotés et volatilisation de l'azote



A retenir

La quantité moyenne des livraisons azotées dans la région Centre Val-de-Loire au cours de ces dernières années (entre 2002 et 2018) est de 268 000 tonnes d'azote, avec une relative stabilité depuis 15 ans.

L'utilisation des engrais minéraux est responsable de 14,5 % des GES agricoles françaises notamment dû à l'émission du protoxyde d'azote.

Selon l'INRA, une fertilisation azotée raisonnée permettrait de réduire les émissions de GES d'un potentiel d'atténuation annuel estimé à 6 Mt CO₂e, soit 7,1% des émissions de GES du secteur agricole de 2017 en France.

Lors de leur utilisation, les engrais minéraux azotés peuvent subir des pertes importantes de leur potentiel de fertilisation via la volatilisation (dégagement d'ammoniac gazeux). C'est l'urée qui va avoir tendance à volatiliser plus que l'ammonitrate (13 % contre 2 %), mais l'ammonitrate (-1200 t/an) est de moins en moins utilisé en région Centre Val-de-Loire au détriment de l'urée (+1800 t/an).

Le secteur agricole est responsable de l'émission d'ammoniac à 99 % en région Centre Val-de-Loire. Limiter les pertes de volatilisation des engrais minéraux et organiques, permet de diminuer le risque d'apparition d'un pic de pollution aux microparticules mais permet également de diminuer la dose d'apport initiale et donc de limiter indirectement les GES agricoles.



Pour en savoir plus

ADEME - <http://www.bilans-ges.ademe.fr> ;

ADEME – Guide des bonnes pratiques agricoles pour l'amélioration de la qualité de l'air – Septembre 2019 ;

Chambre d'Agriculture n°1050 (Février 2016) – Agriculture et qualité de l'air ;

CITEPA (Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique), 2017-
www.citepa.org ;

DEFRA 2005 Ammonia emissions and crop N use efficiency ;

INRA, 2013 - Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? ;

RESEAU ACTION CLIMAT, 2017- Réduction des émissions indirectes du secteur agricole : Mise en place d'un plan national de réduction ambitieuse de l'utilisation des engrais azotés minéraux d'ici à 2050 ;

UNIFA, 2016 - Diminuer les pertes gazeuses pour augmenter l'efficacité de l'azote « Les engagements internationaux de la France dans l'UE ».

5 ATTENUATIONS AGRICOLES



Observatoire Régional sur l'Agriculture et le Changement cLimatique

E4-Surface en protéagineux

🔑 Nature et source des données

Données fournies par la DRAAF

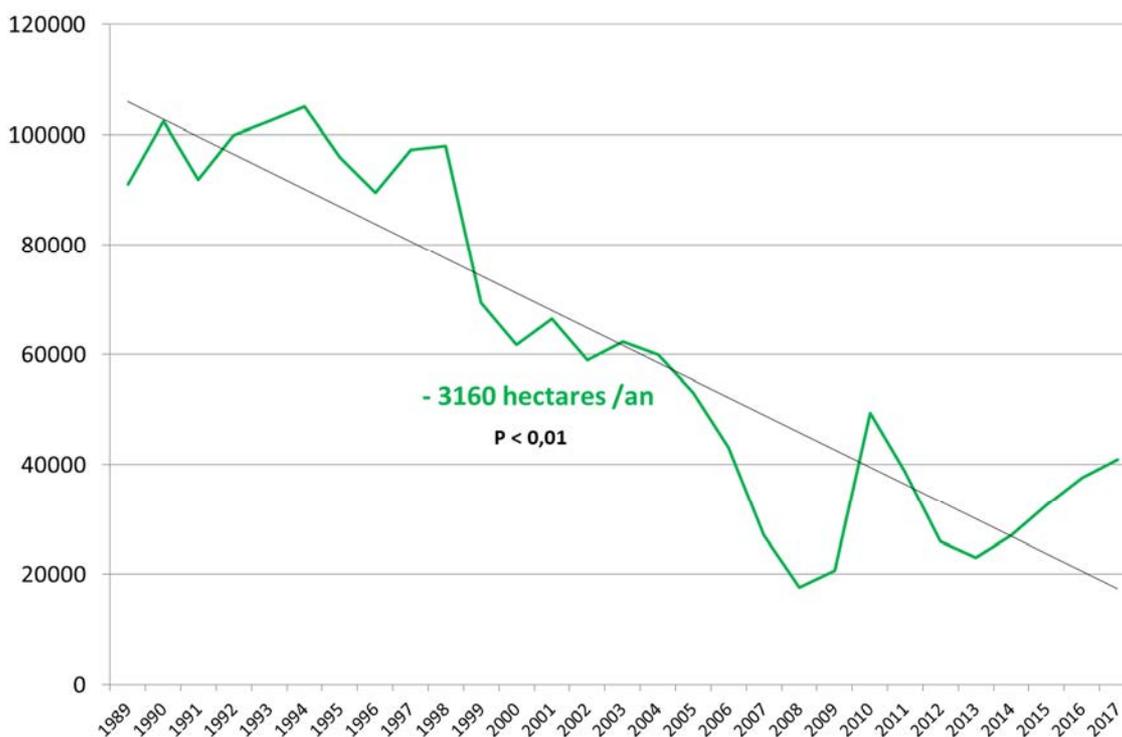
🕒 Indicateur

Surface régionale cultivée en légumineuses à graines : pois protéagineux + féveroles et fèves + lupin doux.

📊 Calcul de l'indicateur

- Cumul des surfaces en pois protéagineux, féveroles et fèves, lupin doux

📈 Évolution observée



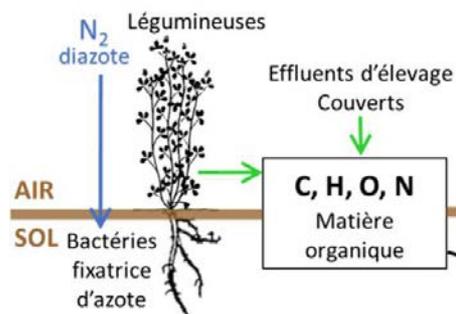
Surface (en ha) de protéagineux en Région Centre Val-de-Loire



E4-Surface en protéagineux

Analyse

Les légumineuses ont la capacité de fixer l'azote atmosphérique grâce à une association symbiotique avec des bactéries (genre *Rhizobium*) présentes au sein de leurs racines (voir schéma ci-contre). Ainsi, ces espèces n'ont pas besoin d'apport d'engrais azoté mais vont également en fournir une partie à la culture suivante, via le système racinaire et aérien (si absence d'exportation dans le cas d'un couvert). Cette entrée d'azote « naturelle » dans la parcelle va mécaniquement baisser la dose d'engrais à apporter sur la culture suivante. Or, dans l'indicateur « Types de gaz à effet de serre émis par secteur agricole », il a été vu que la fabrication d'engrais minérale était énergivore (ex : fabrication d'1 kg d'ammonitrate, libère en moyenne 5,86 kg équivalent CO₂ (ADEME)). La légumineuse est donc une source potentielle d'azote moins émissive en gaz à effet de serre que la fabrication d'azote minérale.



En 2017, les protéagineux (pois protéagineux + féveroles et fèves + lupin doux) représentaient 1,7 % de la SAU régionale. A noter qu'il existe d'autres type de protéagineux : les légumes secs (lentilles, haricots...), les oléoprotéagineux (soja...), et quelques légumineuses fourragères.

En Europe du Nord, le développement des cultures protéagineuses destinées à l'alimentation animale, est récent dans la mesure où il date de l'embargo américain sur le soja en 1973. Pour pallier, au moins partiellement à cet approvisionnement extérieur, l'Europe avait mis en place un plan Protéagineux, dans lequel la France avait joué un rôle majeur. La mise en œuvre de ce plan a conduit à faire de la France le premier producteur européen de protéagineux, et surtout de pois (650 à 700 000 ha). Depuis, la superficie en protéagineux a considérablement diminué (-60%) en 30 ans. La baisse a été forte à partir de 1999 du fait d'un système de compensation moins avantageux, en lien avec la réforme de la PAC. A partir de 2001, un plan protéagineux de 5 ans visait à relancer des cultures riches en protéines mais sans effet en Centre Val-de-Loire. L'augmentation observée en 2010 provient, notamment, de la mesure de la PAC « aide à la diversité des assolements ». Depuis, les surfaces cultivées en région Centre-Val-de-Loire, semblent se stabiliser autour de 40000 ha (DRAAF)

Parmi les différents freins expliquant le non développement actuel de la filière protéique, on peut citer :

- la technicité de la conduite de ces cultures et leur sensibilité à la sécheresse ;
- la diminution des aides PAC destinées à ces cultures ;
- la faible compétitivité économique de cette filière en France dans le contexte mondial.

Au niveau national, il est estimé (INRA, 2013) que le triplement des surfaces observées en 2010 (par substitution de 1/6ème de la sole de blé tendre, de 1/6ème de la sole de colza et de 2/3 de la sole d'orge) permettrait une réduction des engrais de 33 kgN/ha sur la culture suivante ; ce qui réduirait les émissions de GES (principalement N₂O lié à la baisse de la fertilisation) de 0,92 Mt CO₂e par an, soit 0,8 % des émissions agricoles annuelles françaises de GES.

En intégrant les émissions indirectes, liée à la moindre fabrication d'engrais minéral, la réduction des émissions de GES serait de 1,75 teq CO₂ par hectare implanté et par an.

Appliqué à la région Centre Val-de-Loire, ce scénario de triplement des surfaces en légumineuses occupées en 2017, conduirait à une surface en légumineuses d'environ 120 000 hectares, soit 5 % de la SAU régionale. Une particularité de ce levier agricole d'atténuation est qu'il impose un changement significatif des rotations, ce qui peut avoir des répercussions importantes sur les systèmes de production.

5 ATTENUATIONS AGRICOLES



Observatoire Régional sur l'Agriculture et le Changement cLimatique

E4-Surface en protéagineux



A retenir

Conséquence d'une histoire politique peu favorable, les protéagineux occupent actuellement 40 000 ha en Centre Val-de-Loire, soit environ 1,7 % de la SAU régionale.

A l'échelle nationale, le triplement de la surface occupée en 2017 par les légumineuses à graines (en substitution à des grandes cultures) générerait une réduction de 0,8 % des émissions agricoles annuelles françaises de GES.

Transposé à l'échelle régionale, ce scénario porterait leur surface à 120 000 ha, soit 5 % de la SAU régionale.



Pour en savoir plus

ADEME - <http://www.bilans-ges.ademe.fr> ;

DRAAF Centre Val-de-Loire – Céréales et oléagineux – Novembre 2016.

INRA, 2013 - Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ?

Lexique simplifié

Adaptation Ajustement des systèmes naturels ou humains en réponse à des stimuli climatiques présents ou futurs ou à leurs effets, afin d'atténuer les effets néfastes ou d'exploiter les opportunités bénéfiques. En agriculture, l'adaptation :

- diffère en fonction du système de production et de sa localisation notamment ;
- peut concerner tout ou partie de chaque système de production ;
- consiste à atténuer les effets néfastes du changement climatique tout autant qu'à exploiter ses opportunités ;
- nécessite la connaissance des évolutions probables du climat et des relations entre climat et production végétale.

Atténuation Réduction des émissions de gaz à effet de serre issues des activités humaines destinée à réduire l'ampleur du changement climatique.

Chaîne SIM (SAFRAN-ISBA-MODCOU) Chaîne de calcul opérationnelle de Météo France dédiée à l'étude spatialisée du bilan d'eau et d'énergie au pas de temps journalier depuis 1958. Elle couvre la France métropolitaine avec une grille de 8km x 8 km. Elle permet notamment d'étudier l'évolution de l'humidité du sol et des pluies efficaces (infiltration + ruissellement) à l'échelle de territoires.

Impact Effet du changement climatique sur une activité humaine ou sur son environnement. S'étudie généralement en l'absence de toute mesure d'adaptation.

Observation Information issue d'un constat ou d'une mesure in situ. Elle correspond à une réalisation véritable du phénomène étudié. Les séries longues d'observations permettent d'identifier d'éventuelles tendances climatiques ou agricoles en lien avec le changement climatique.

Modélisation Représentation virtuelle d'un système et de ses lois de fonctionnement permettant de reproduire son fonctionnement, notamment par voie informatique. Modélisation climatique et modélisation agronomique sont utilisées pour estimer les effets futurs à long terme (mi XXIème et fin XXIème siècle) du changement climatique sur l'agriculture.

Ré-analyse Utilisation a posteriori des modèles numériques de prévision du temps pour reconstruire le climat passé à partir de l'ensemble des données météorologiques disponibles. Dans le cadre du projet Climsec, une réanalyse hydro-météorologique a été effectuée sur la période 1958-2008 en utilisant la chaîne de modèles Safran-Isba-Modcou (SIM).

Série climatologique Suite – idéalement continue - de données météorologiques en un lieu donné, suffisamment longue (30 ans au moins) pour caractériser le climat de ce lieu.

Série homogénéisée (SH) Série climatologique corrigée à l'aide de méthodes statistiques des biais et des ruptures liés aux modifications dans les conditions de la mesure (déplacement de la station, changement de capteur...) ayant impacté la valeur mesurée. Non corrigés, ces biais et ruptures peuvent conduire à des conclusions erronées sur les évolutions climatiques observées. Les séries homogénéisées constituent donc des références pour analyser l'évolution du climat des décennies écoulées. Pour un usage agricole, leur principale limite réside dans leur pas de temps mensuel.

Série quotidienne de référence (SQR) Série climatologique à pas de temps journalier et sans correction des biais et ruptures, jugée apte à l'étude du changement climatique observé. Elle est sélectionnée par identification dans les SH (Cf. série homogénéisée) de périodes supposées homogènes pour chaque série de données. Pour un usage agricole, leur principal atout réside dans leur pas de temps journalier qui permet le calcul d'indicateurs agro-climatiques.

Scénario d'émission (de gaz à effet de serre) Hypothèse d'évolution future des émissions mondiales de gaz à effet de serre. Les concentrations en gaz à effet de serre issues des scénarios d'émission, permettent d'alimenter les modèles climatiques de description des climats futurs possibles.

Edition 2020 : liste des fiches

1 CHANGEMENT CLIMATIQUE

A1-Température moyenne annuelle.....	8
A2-Nombre de jours estivaux annuel	14
A3-Nombre de jours de gel annuel	19
A4-Cumul annuel des pluies	25
A5-Cumul saisonnier des pluies.....	31
A6-Cumul annuel d'évapotranspiration potentielle (ETP)	35
A7-Cumul saisonnier d'évapotranspiration potentielle (ETP).....	38
A8-Déficit hydrique climatique (Pluies - ETP).....	42

2 AGRO CLIMAT

B1-Nombre de jours échaudants au printemps	47
B2-Nombre de jours de gel du 1er mars au 30 avril	51
B3-Début, durée et fin de la période de gel.....	55
B4-Indice de Winkler	61
B5-Indice de fraîcheur des nuits du 1er au 30 septembre	66
B6-Faisabilité d'une culture intermédiaire	71
B7-Date de reprise de végétation de la prairie et mise à l'herbe	77
B8-Episodes pluvieux intenses.....	83

3 IMPACTS AGRICOLES

C1-Rendement en blé tendre.....	87
C2-Rendement en maïs grain	93
C3-Dates de débourrement, floraison et maturité du raisin.....	100
C4-Teneur en sucre et en acidité totale des raisins	104
C5-Date de floraison du Douglas.....	109
C6 - Date de pleine floraison du pommier : Variété Golden.....	112
C7-Hydraulicité : débits des cours d'eau	115
C8-Niveau des nappes d'eau souterraine.....	118

4 ADAPTATIONS

A venir

5 ATTENUATIONS

E1-Occupation du sol et matière organique des sols.....	123
E2-Les émissions agricoles de gaz à effet de serre et le stockage carbone.....	127
E3-Livraisons des engrais minéraux azotés et volatilisation de l'azote.....	142
E4-Surface en protéagineux.....	150



Qu'est-ce qu'ORACLE Centre Val-de-Loire ?

ORACLE Centre Val-de-Loire est un Observatoire Régional sur l'Agriculture et le Changement climatique. Il établit un constat objectif du changement climatique et de ses conséquences avérées sur l'activité agricole régionale. Il s'appuie sur des observations qui sont mises à jour régulièrement.

ORACLE Centre Val-de-Loire est organisé en 5 thèmes :

1 CHANGEMENT CLIMATIQUE

2 AGRO CLIMAT

3 IMPACTS AGRICOLES

4 ADAPTATIONS

5 ATTENUATIONS

ORACLE Centre Val-de-Loire est destiné à tous ceux qui se sentent concernés par l'avenir de l'agriculture régionale en lien avec le changement climatique : agriculteurs, conseillers agricoles, agents des services de l'état, élus et agents de collectivités territoriales, gestionnaires de ressources ou de territoires, membres d'associations, enseignants, élèves.

Contacts :

Christophe BEAUJOUAN – Chambre Régionale d'Agriculture de Centre Val-de-Loire

Stagiaire 2019 – Salma LAMGHARI - Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier
