

ETUDE D'UNE LONGUE SERIE

DE DONNEES METEO :

- quelques éléments sur le changement climatique à Clermont-Ferrand.**
- quels effets sur la culture du blé?**

Données climatiques issues de la base Climatik (unité Agroclim, INRAE Avignon) :

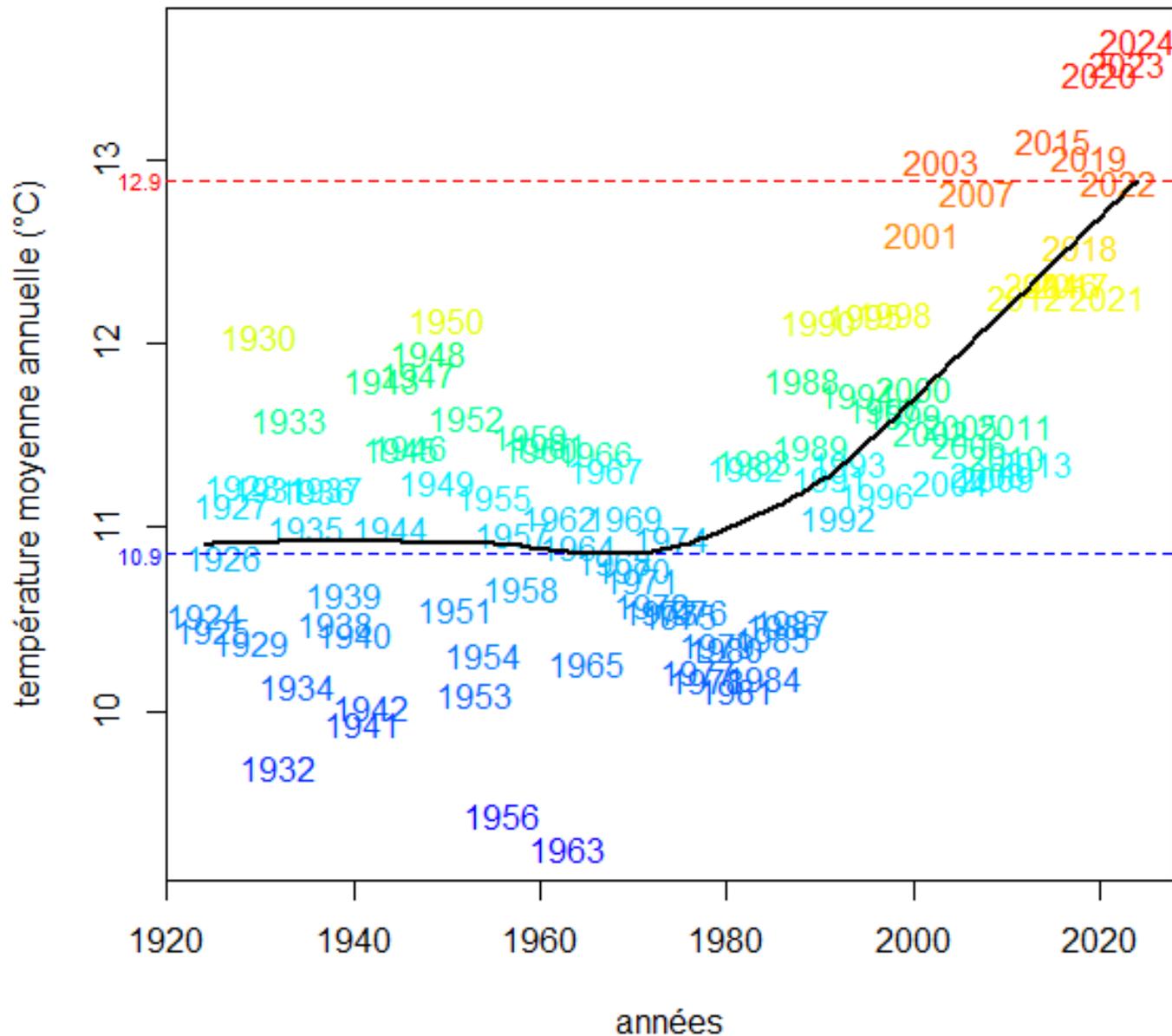
Clermont: années 1924 à 2024.

Variables de base:

- Température (Tmin, Tmoy, Tmax).
- Pluie.
- Rayonnement à partir de 1978.
- ETP (Penman) à partir de 1982.

Température

EVOLUTION DE LA TEMPERATURE MOYENNE Clermont-Ferrand



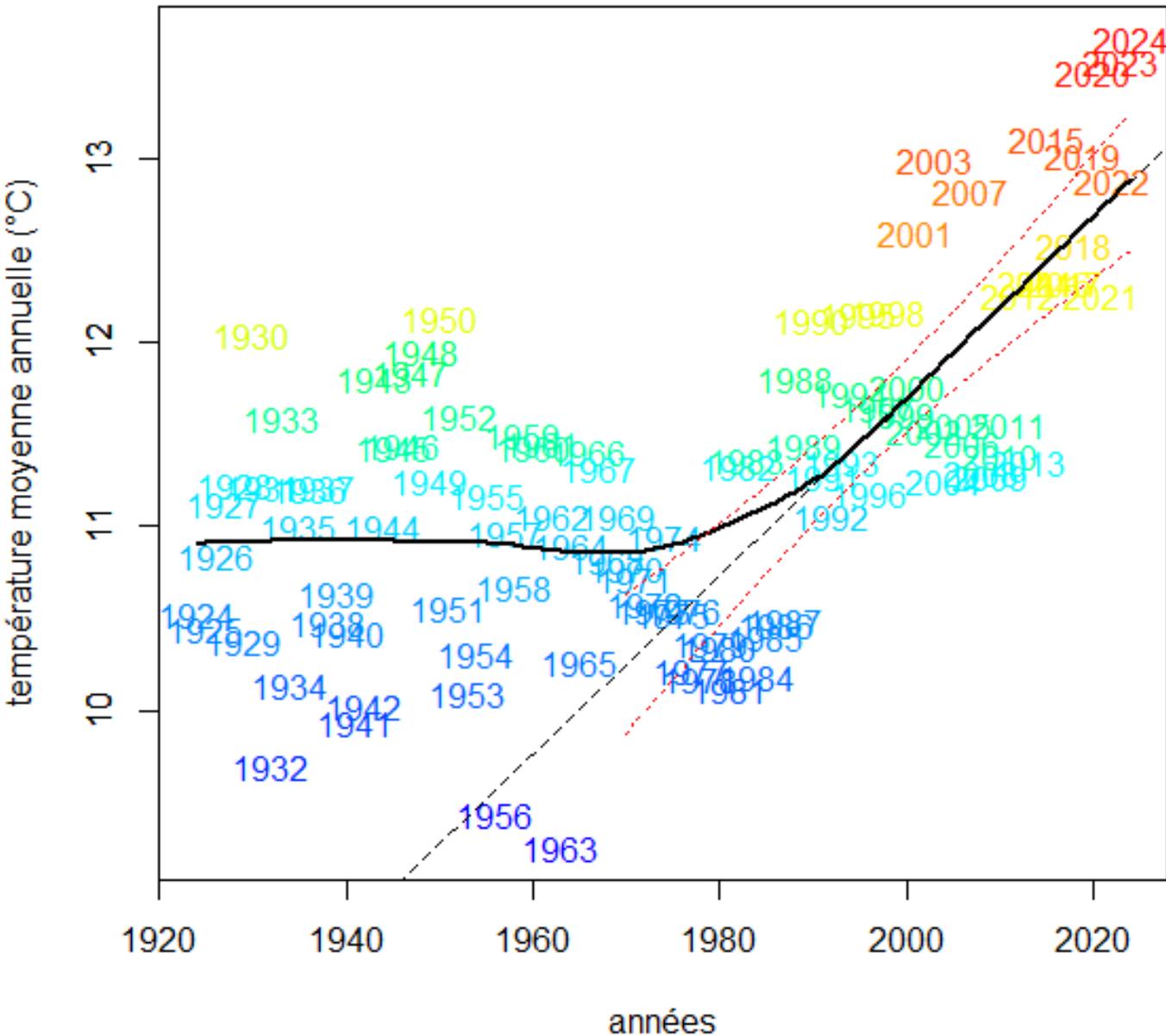
Sur les 5 dernières années on a battu 3 fois le record de température.

Les 10 années les plus chaudes sont toutes postérieures à 2000.

En tendance, les températures ont augmenté de 2°C depuis le début du réchauffement climatique.

EVOLUTION DE LA TEMPERATURE MOYENNE

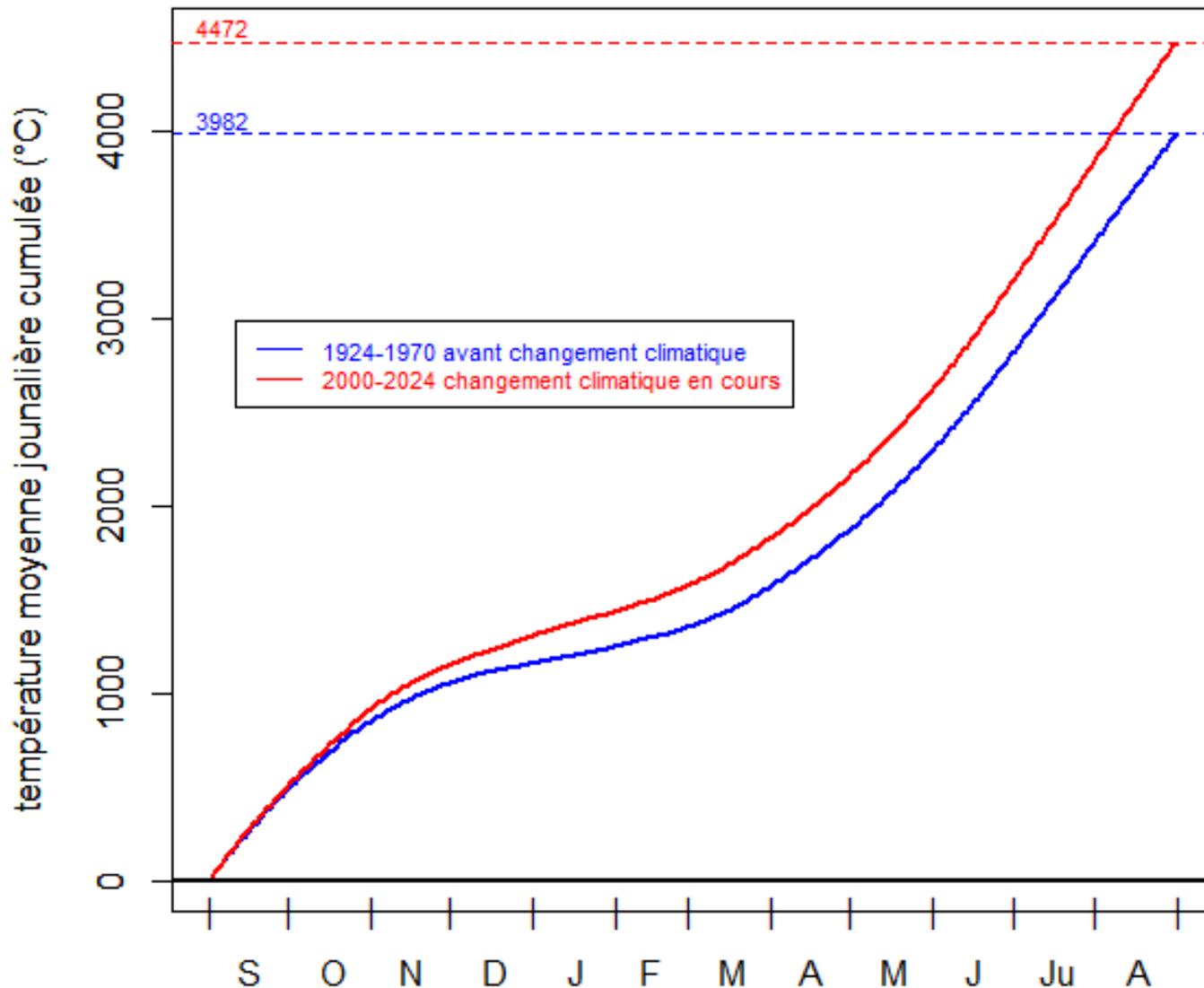
effectif = 55 $y = -85.41 + x(0.0486)$ $R^2 = 0.67$



Avec cette valeur de pente, on prend 1 degré supplémentaire tous les 21 ans.

En 2050 on sera à 14.2°C (+3.3°C par rapport au début du changement climatique).

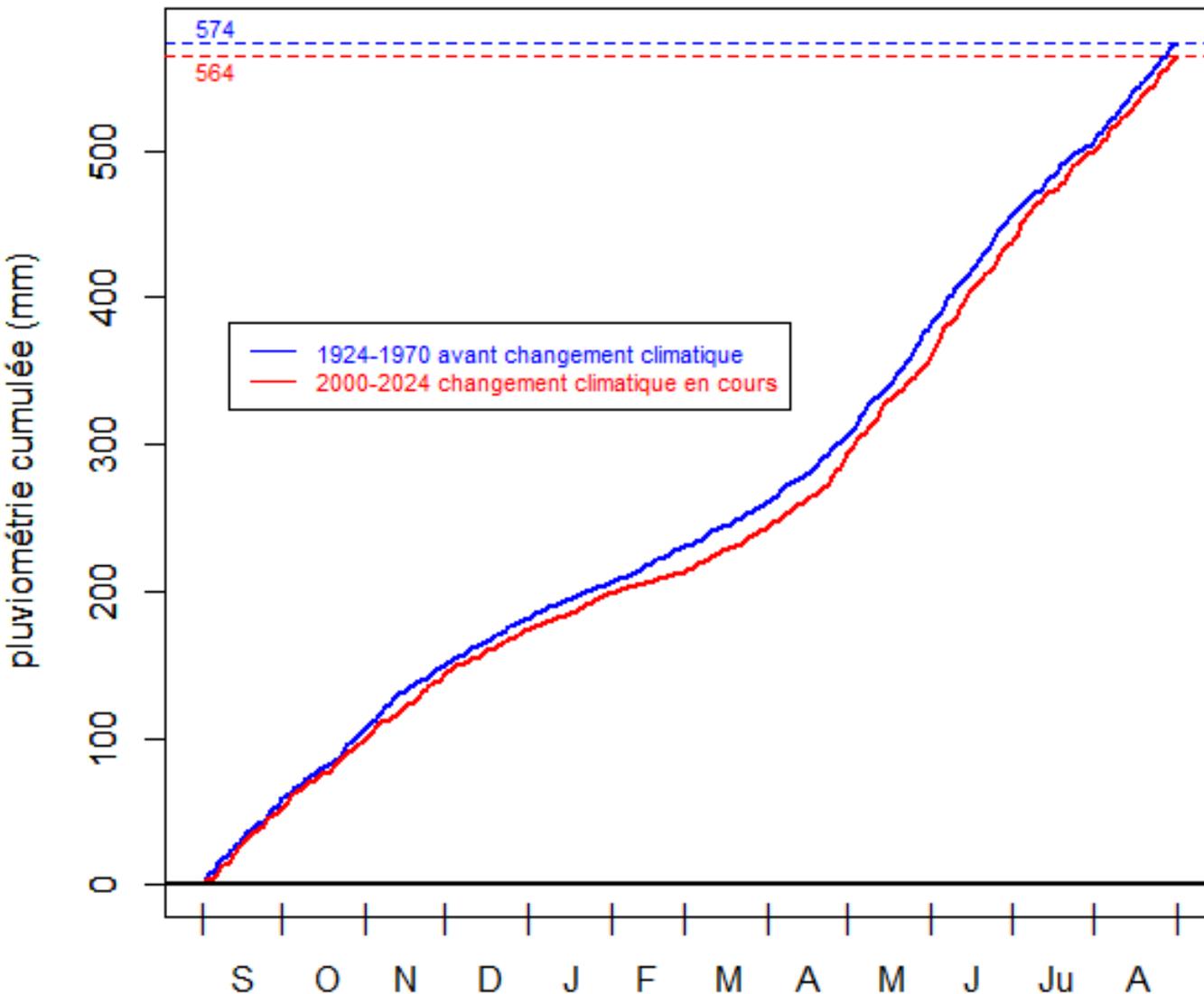
EVOLUTION DU CUMUL DE TEMPERATURES



En moyenne sur 2000-2024, on cumule 490°C de plus sur l'année que pour la période 1924-1970 (12.3% d'augmentation).

Pluviométrie

EVOLUTION DE LA PLUVIOMETRIE CUMULEE



En moyenne et en cumulé sur l'année, on a 10mm en moins pour la période 2000-2024 par rapport à la période 1924-1970 (diminution de 1.8%).

Cependant, le déficit est maximum de février à juin, donc pendant la montaison et le remplissage.

Rayonnement

Le rayonnement RG n'est disponible qu'à partir de 1978. On tente donc de prédire les valeurs du rayonnement à partir des variables climatiques qui sont disponibles pour la totalité des années et qui sont en relation avec RG (Tmoy, Tmax, Tmin et Pluie).

Les variables explicatives étant fortement corrélées, on utilise la régression PLS.

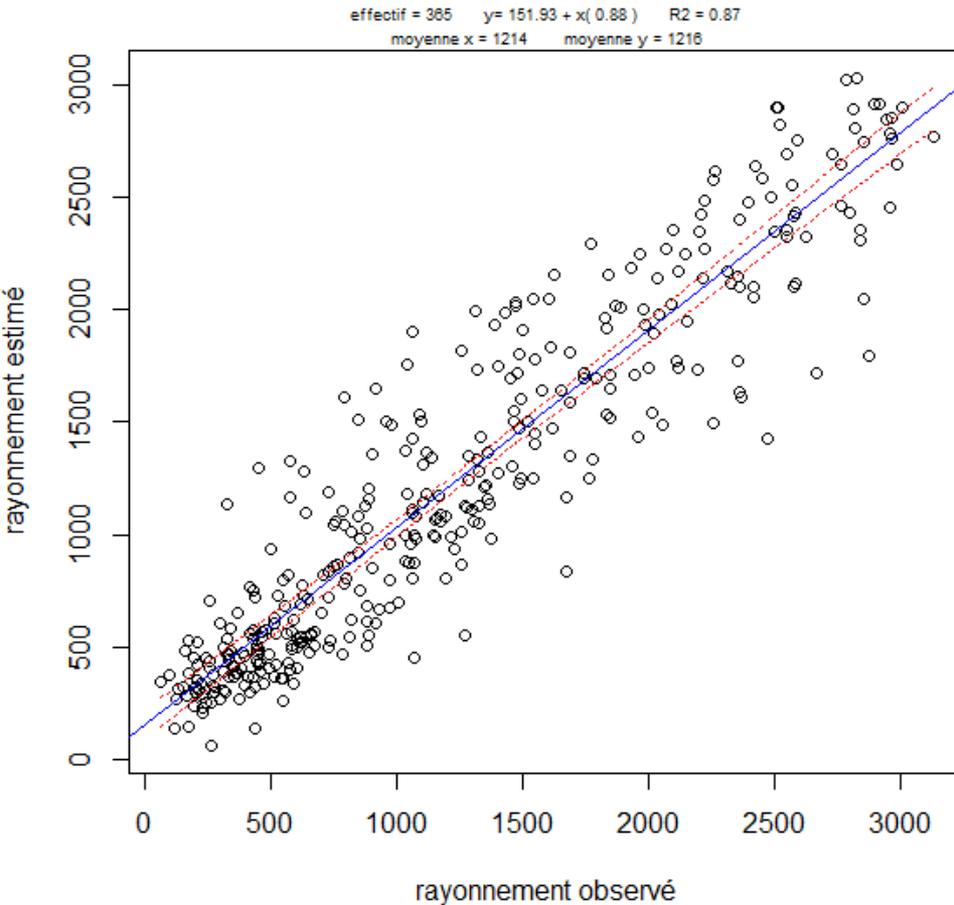
Modèle : $RG = f(T_{moy}, T_{max}, T_{min}, Pluie + Photopériode)$

Le rayonnement RG n'est disponible qu'à partir de 1978. On tente donc de prédire les valeurs du rayonnement à partir des variables climatiques qui sont disponibles pour la totalité des années et qui sont en relation avec RG (Tmoy, Tmax, Tmin et Pluie).

Les variables explicatives étant fortement corrélées, on utilise la régression PLS.

Modèle : $RG = f(T_{moy}, T_{max}, T_{min}, \text{Pluie} + \text{Photopériode})$

CLERMONT-Fd 2001



Pour une année donnée, l'estimation des rayonnements journaliers par régression PLS semble utilisable :

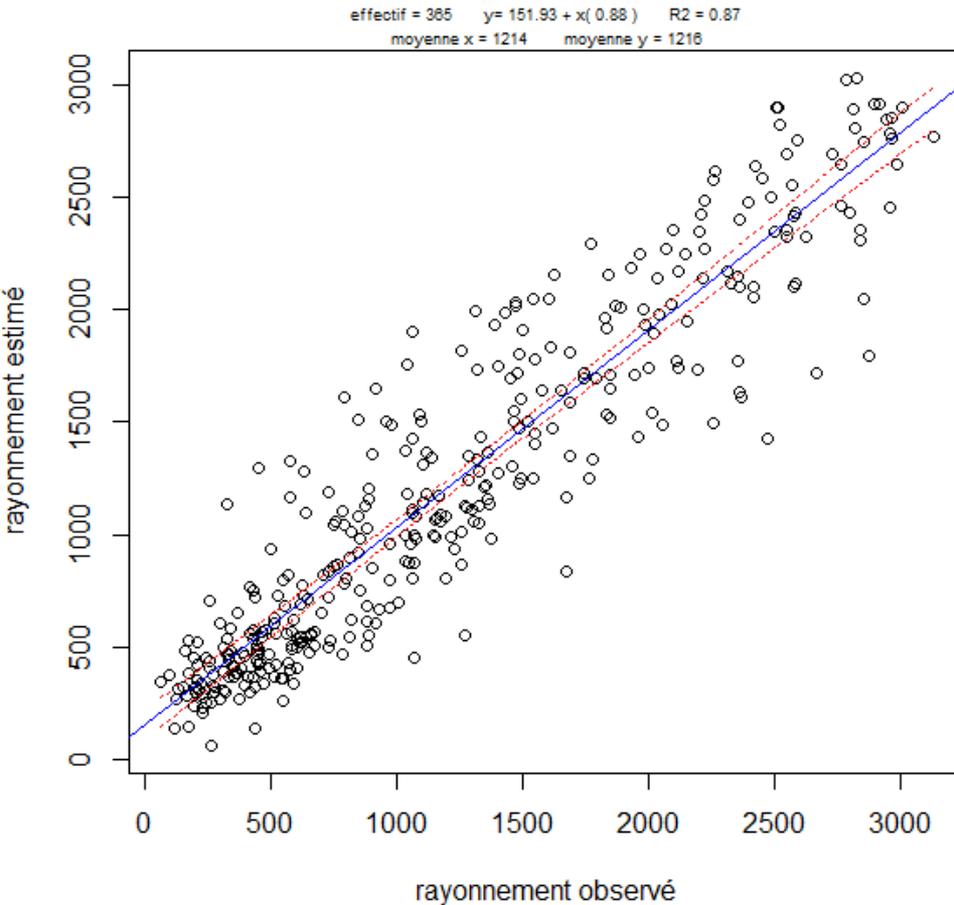
- le R^2 de la relation entre estimés et observés est élevé.
- les moyennes des estimés et des observés sont similaires.

Le rayonnement RG n'est disponible qu'à partir de 1978. On tente donc de prédire les valeurs du rayonnement à partir des variables climatiques qui sont disponibles pour la totalité des années et qui sont en relation avec RG (Tmoy, Tmax, Tmin et Pluie).

Les variables explicatives étant fortement corrélées, on utilise la régression PLS.

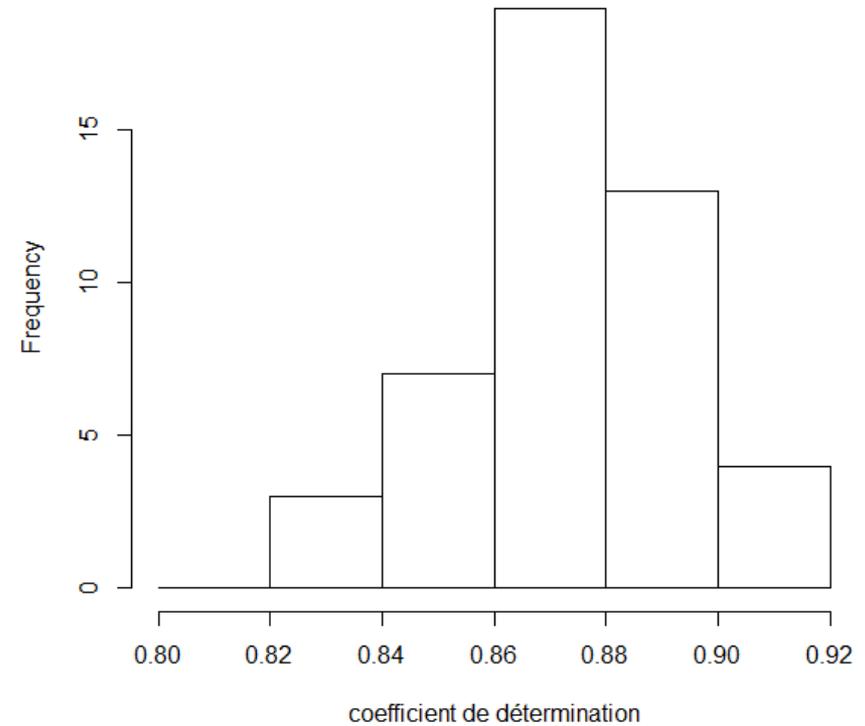
Modèle : $RG = f(T_{moy}, T_{max}, T_{min}, \text{Pluie} + \text{Photopériode})$

CLERMONT-Fd 2001



RELATION ENTRE RAYONNEMENT OBSERVE ET RAYONNEMENT ESTIME
années 1978 à 2023

moyenne = 0.87 (n = 46)



Pour une année donnée, l'estimation des rayonnements journaliers par régression PLS semble utilisable :

- le R^2 de la relation entre estimés et observés est élevé.
- les moyennes des estimés et des observés sont similaires.

Sur l'ensemble des années avec valeurs de RG disponibles, le R^2 de la relation entre estimés et observés ne descend jamais en dessous de 80%.

Bilan P-ETP

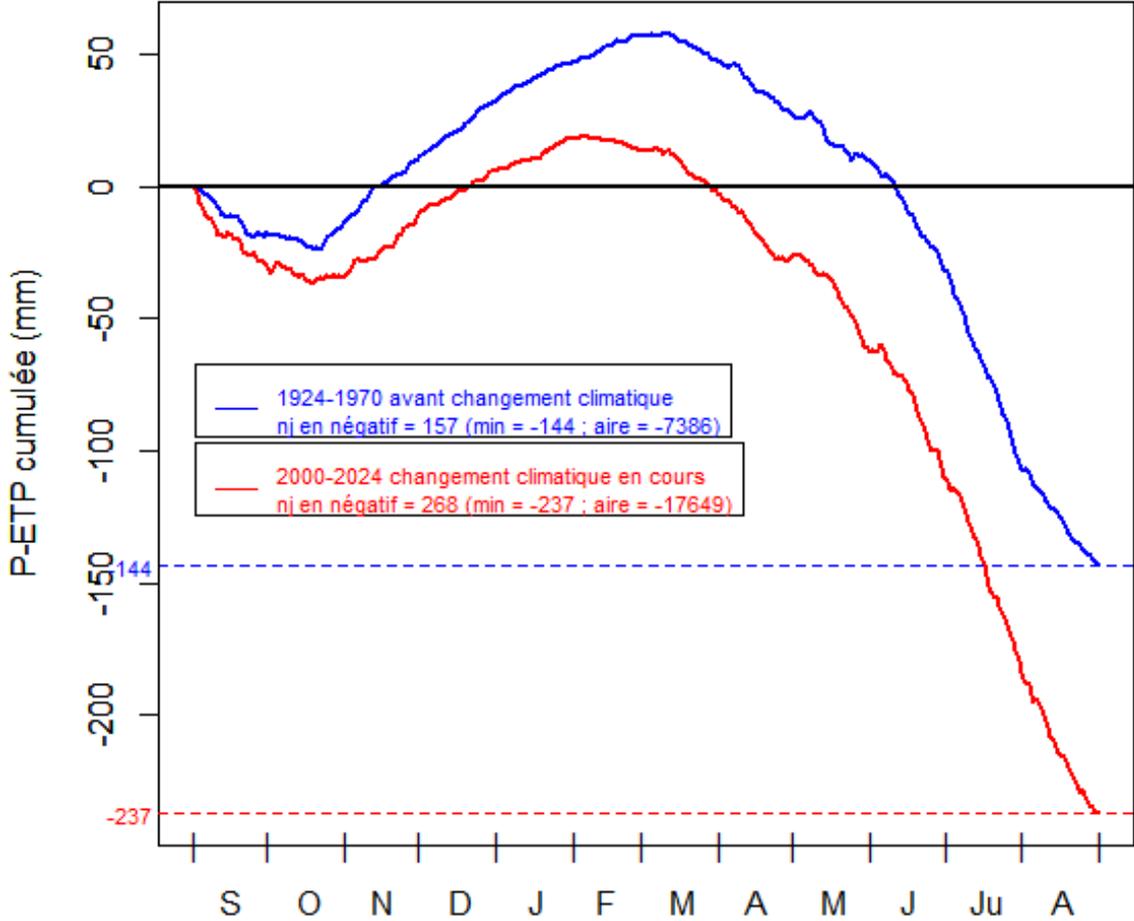
Grâce à l'estimation des valeurs de RG par régression PLS, on peut calculer les ETP journalières pour toutes les années, avec la formule de Turc:

$$ETP_{Turc} = (k / 30) * (Tmoy / (Tmoy + 15)) * ((RG / 4.18) + 50) \quad \text{avec } k = 0.4 \text{ (sauf en février où } k = 0.37)$$

Grâce à l'estimation des valeurs de RG par régression PLS, on peut calculer les ETP journalières pour toutes les années, avec la formule de Turc:

$$ETP_{Turc} = (k / 30) * (T_{moy} / (T_{moy} + 15)) * ((RG / 4.18) + 50) \quad \text{avec } k = 0.4 \text{ (sauf en février où } k = 0.37)$$

EVOLUTION DU BILAN P-ETP (Clermont-Ferrand)



En moyennant les bilans P-ETP sur 2 périodes contrastées, on constate une nette dégradation.

Très forte augmentation de l'aire sous l'axe h=0 entre la période 1924-1970 et la période 2000-2022.

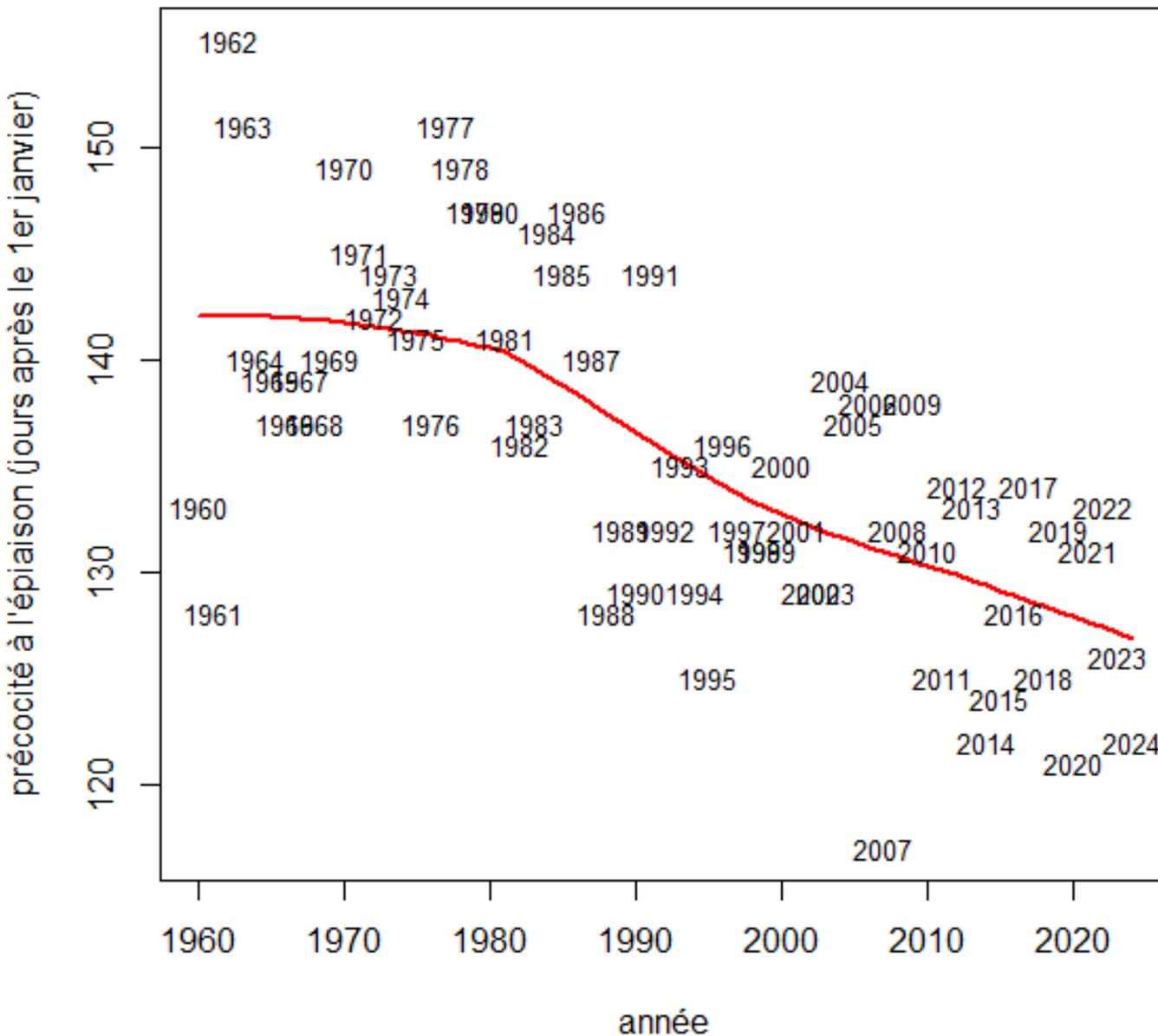
Effet du changement climatique sur la durée du cycle végétatif du blé

- série météo de Clermont-Ferrand (1924-2024).
- données pépinière sur 1960-2024:
 - dates de semis (pour début de cycle végétatif).
 - dates d'épiaison pour plusieurs variétés sur des périodes assez longues:
 - **Etoile-de-Choisy (65 années).** série la plus longue
 - Capitole (60 années).
 - Talent (48 années).
 - Courtot (50 années).
 - **Nebraska (44 années).** génotype très précoce
 - Funone (42 années).
 - Norin27 (40 années).
 - Thésée (39 années).
 - Soissons (34 années).
 - **Cappelle (28 années).** génotype très tardif

Les dates de semis et d'épiaison permettent de caler différentes phases du cycle.

Nécessité d'extrapoler des dates de semis et des précocités à l'épiaison sur la période 1924-1959 pour valoriser la totalité du jeu de données météo.

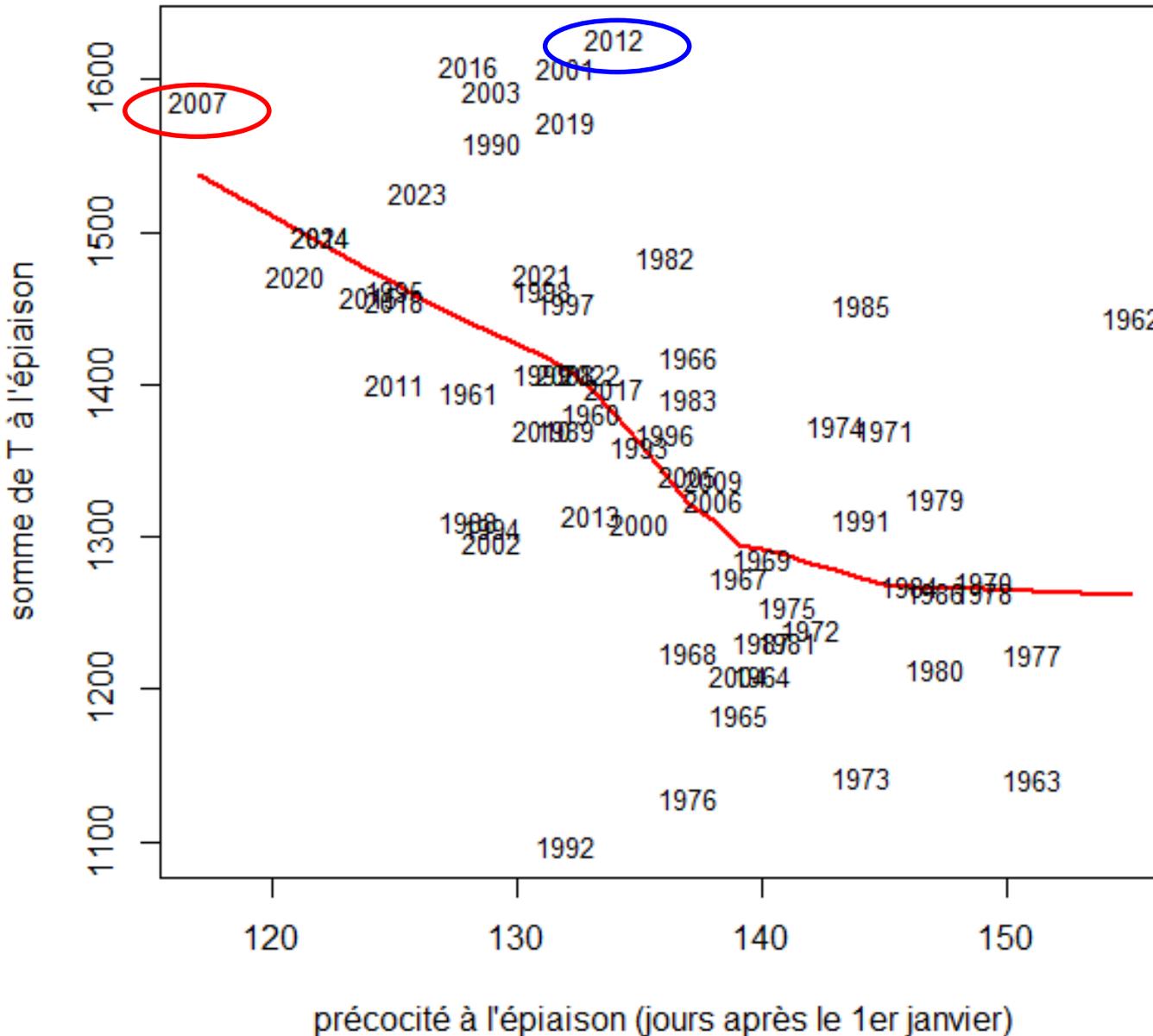
Evolution de la date d'épiaison (Etoile de Choisy)



Beaucoup de fluctuations inter-annuelles, mais effet manifeste du changement climatique sur la date d'épiaison.

Nécessité d'un modèle pour estimer la précocité d'un génotype donné en fonction de l'année.

Variabilité de la précocité de EtoileDeChoisy



La précocité à l'épiaison est liée à la somme de températures depuis le semis, mais avec une modulation par la vernalisation et la photopériode (frein vernal-photo-périodique).

2007 : hiver très doux, donc épiaison très précoce,..., mais une des sommes de températures les plus élevées.

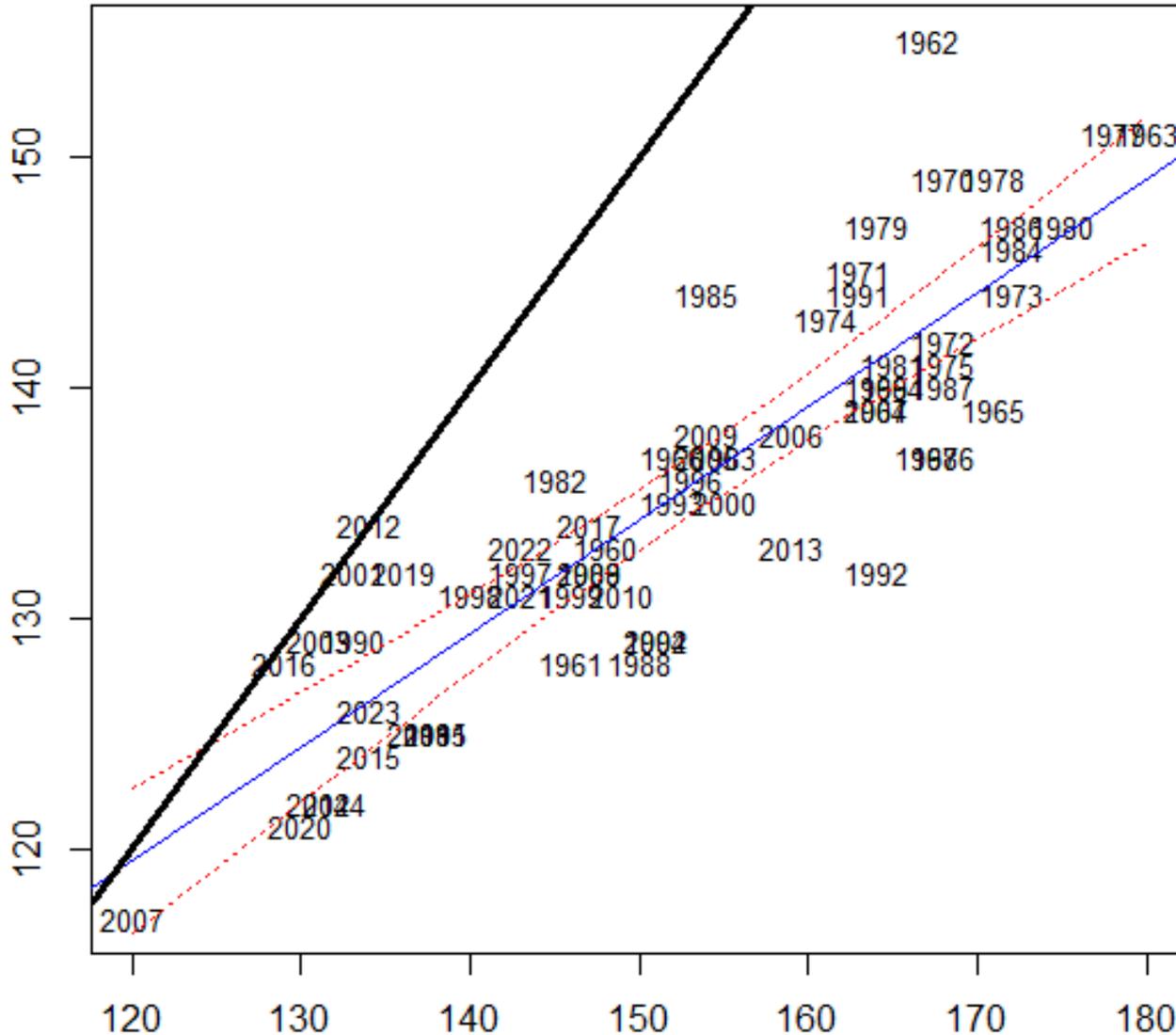
On retient comme valeur caractéristique d'Etoile de Choisy, la somme de températures la plus élevée observée à l'épiaison (1620dj en 2012).

On regarde ensuite, pour chaque année, la date à laquelle on atteint cette somme de températures.

Modélisation du frein photopériodique pour EtoileDeChoisy

effectif = 65 $y = 60.454 + x(0.492)$ $R^2 = 0.76$

précocité à l'épiaison observée (jours après le 1er janvier)



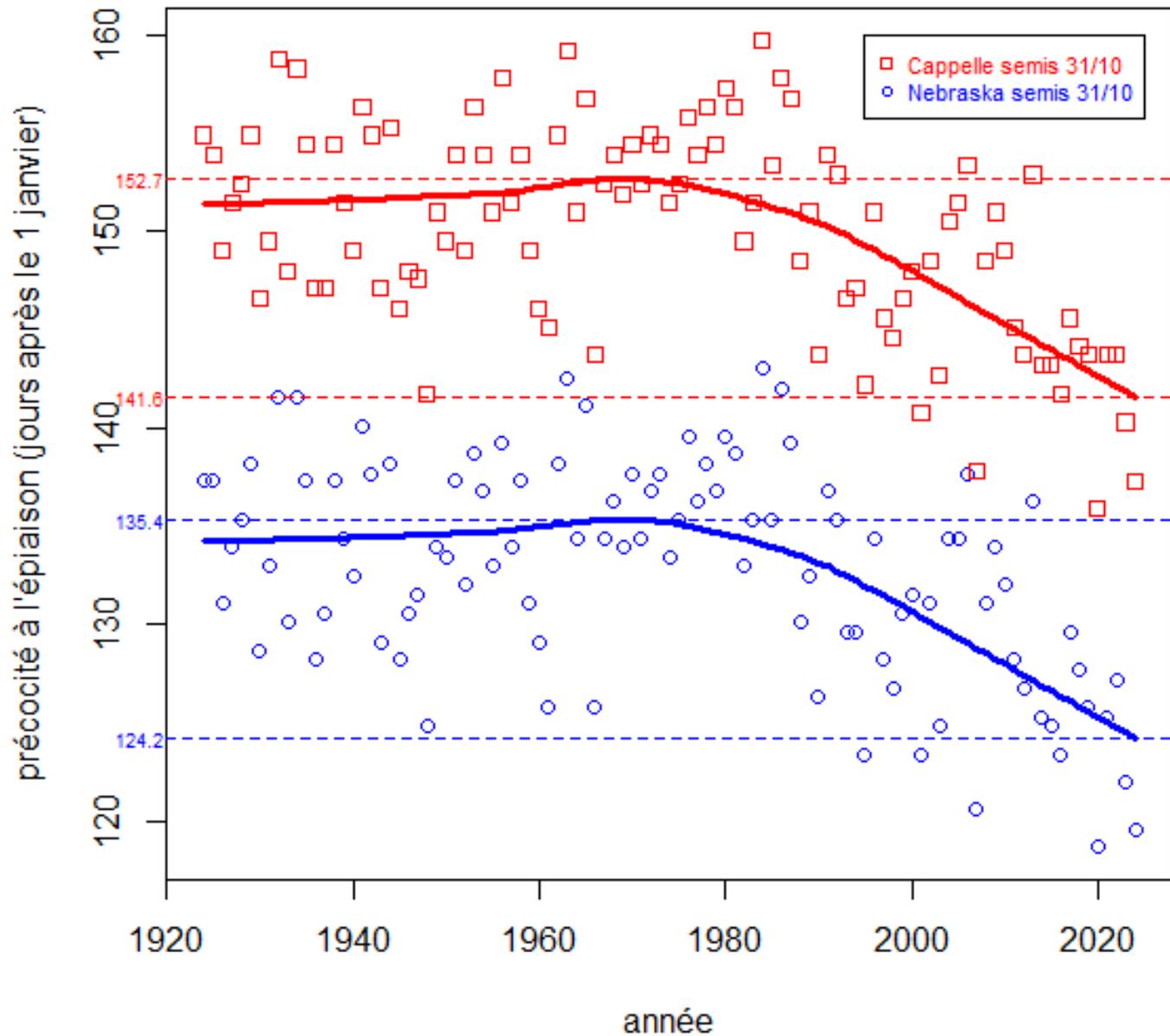
On obtient une équation qui donne la précocité en fonction du jour où on atteint la somme de températures caractéristique (1620dj à partir de la date de semis).

Si on était sur la bissectrice, ça voudrait dire qu'il n'y a qu'un effet de la température.

Modèle simple mais assez précis (R^2 de l'ordre de 0.75 pour l'ensemble des géotypes pour lesquels on avait une longue série de précocités à l'épiaison).

jour où on atteint la somme de température maxi observée

EVOLUTION DE LA PRECOCITE A L'EPIAISON



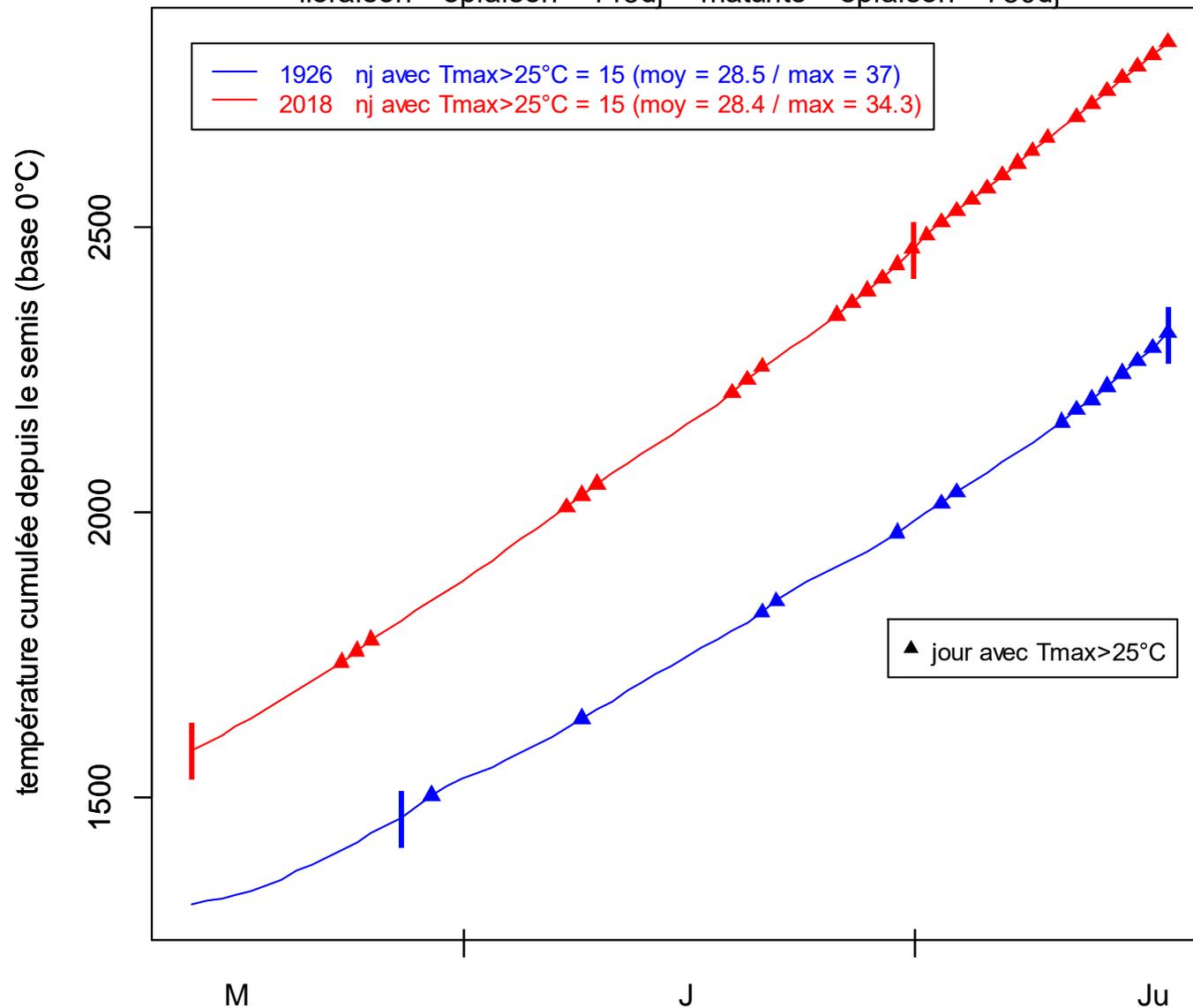
Pour une date de semis constante au 31/10, l'effet du réchauffement climatique sur la date d'épiaison est très net (-11 jours pour Cappelle et Nebraska).

Evolution des facteurs limitants.

**Exemple du stress thermique (températures échaudantes)
pendant le remplissage du grain.**

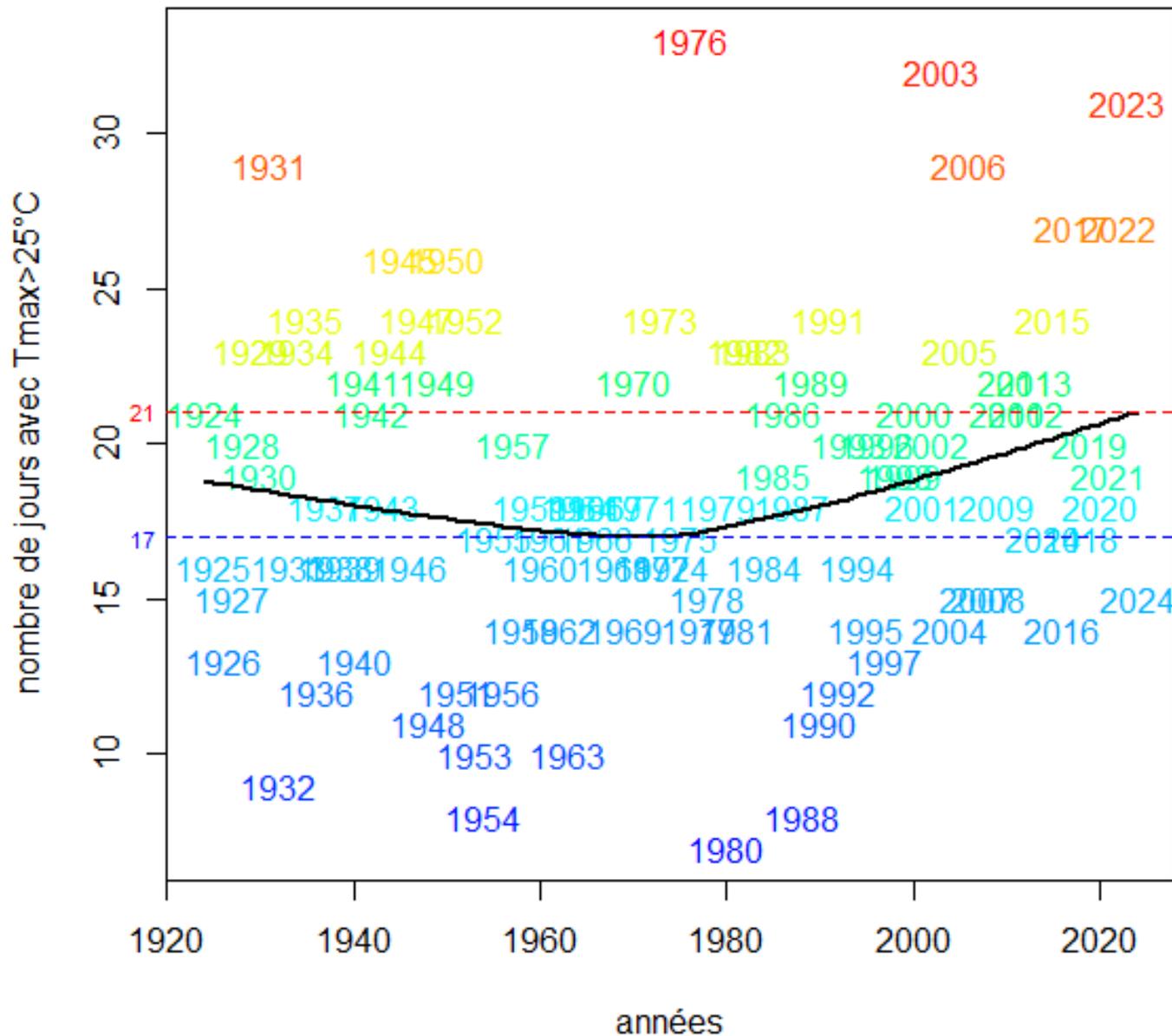
STRESS THERMIQUE PENDANT LE REMPLISSAGE DU GRAIN (entre floraison de Nebraska et maturité de Cappelle)

floraison = épiaison + 145dj maturité = épiaison + 780dj



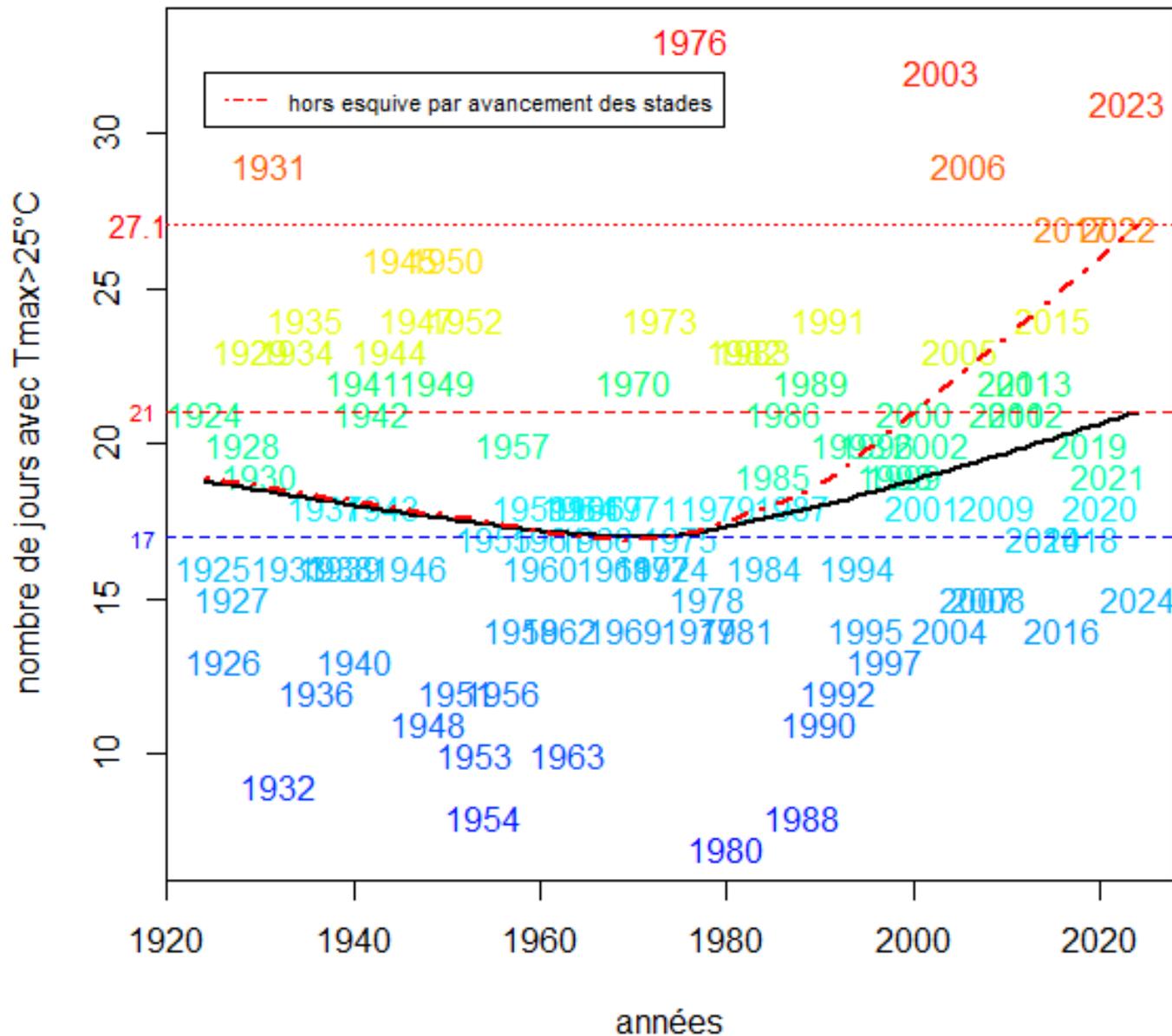
Le changement climatique, en avançant les dates de floraison et de maturité, permet l'évitement d'un grand nombre de jours à températures échaudantes en fin de cycle.

STRESS THERMIQUE PENDANT LE REMPLISSAGE DU GRAIN (entre floraison de Nebraska et maturité de Cappelle)



Pour une date de semis constante au 31/10, l'avancement des stades fait que le nombre de jours avec Tmax > 25°C entre floraison de Nebraska et maturité de Capelle évolue peu.

STRESS THERMIQUE PENDANT LE REMPLISSAGE DU GRAIN (entre floraison de Nebraska et maturité de Cappelle)

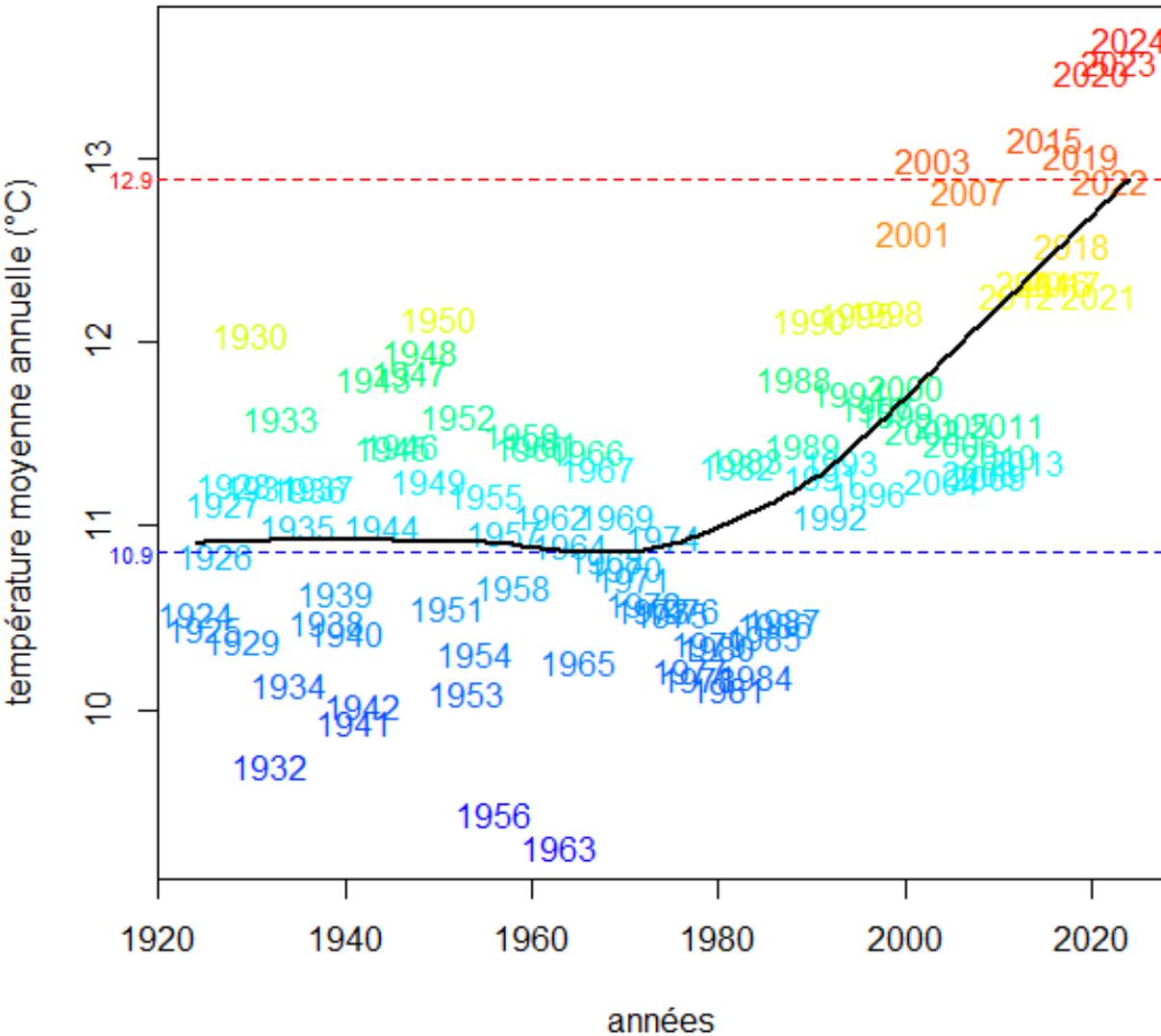


L'avancement des stades dû au changement climatique permet, en tendance, d'éviter 6 jours avec Tmax > 25°C pendant le remplissage des grains.

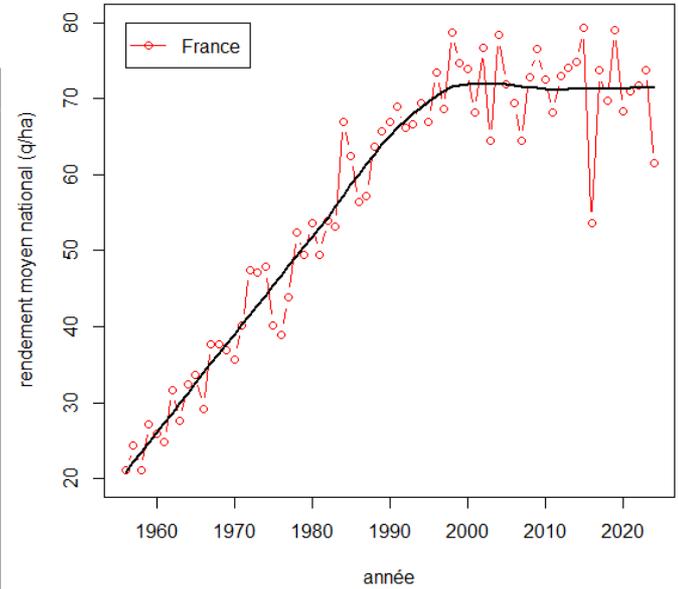
Cependant, ce nombre de jours avec Tmax > 25°C passe de 17 à 21 entre le début des années 80 et 2024 : on est sans doute en train d'atteindre les limites du phénomène d'esquive.

Changement climatique et stagnation des rendements

EVOLUTION DE LA TEMPERATURE MOYENNE Clermont-Ferrand



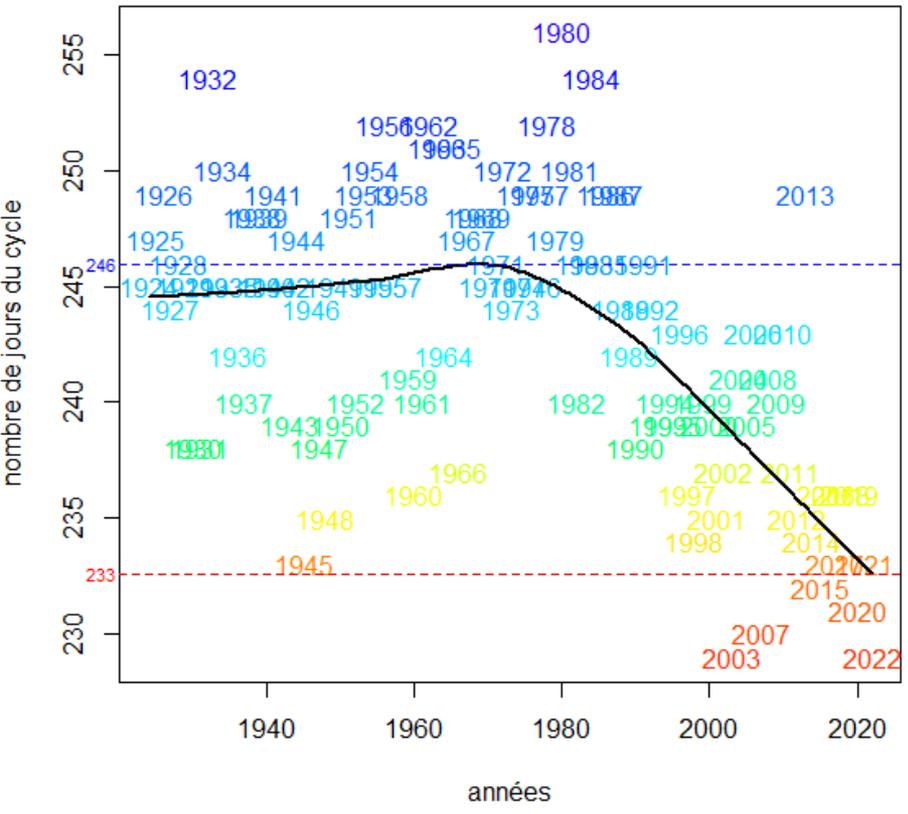
EVOLUTION DES RENDEMENTS (1956-2024)



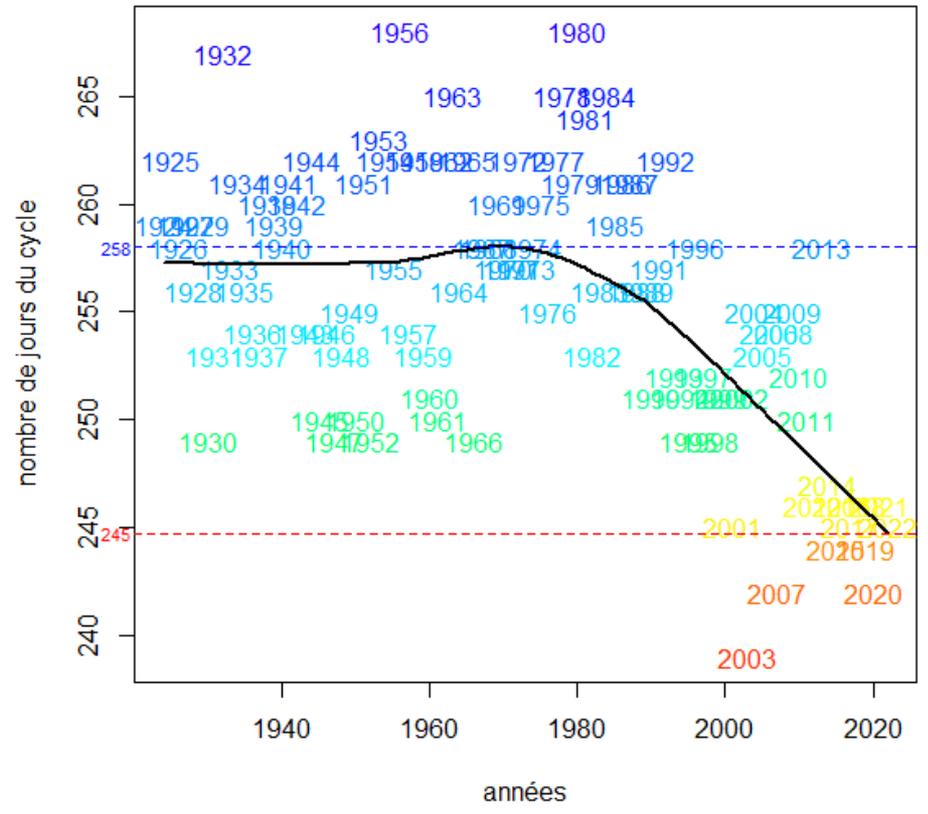
Il y a un décalage entre le début du réchauffement climatique (années 80) et le début de la stagnation des rendements (années 90),..., mais la symétrie entre les 2 courbes est parlante.

Le cycle va du semis à la maturité (= épiaison + 780dj).

EVOLUTION DE LA DUREE DU CYCLE DE NEBRASKA
(semis le 31/10)



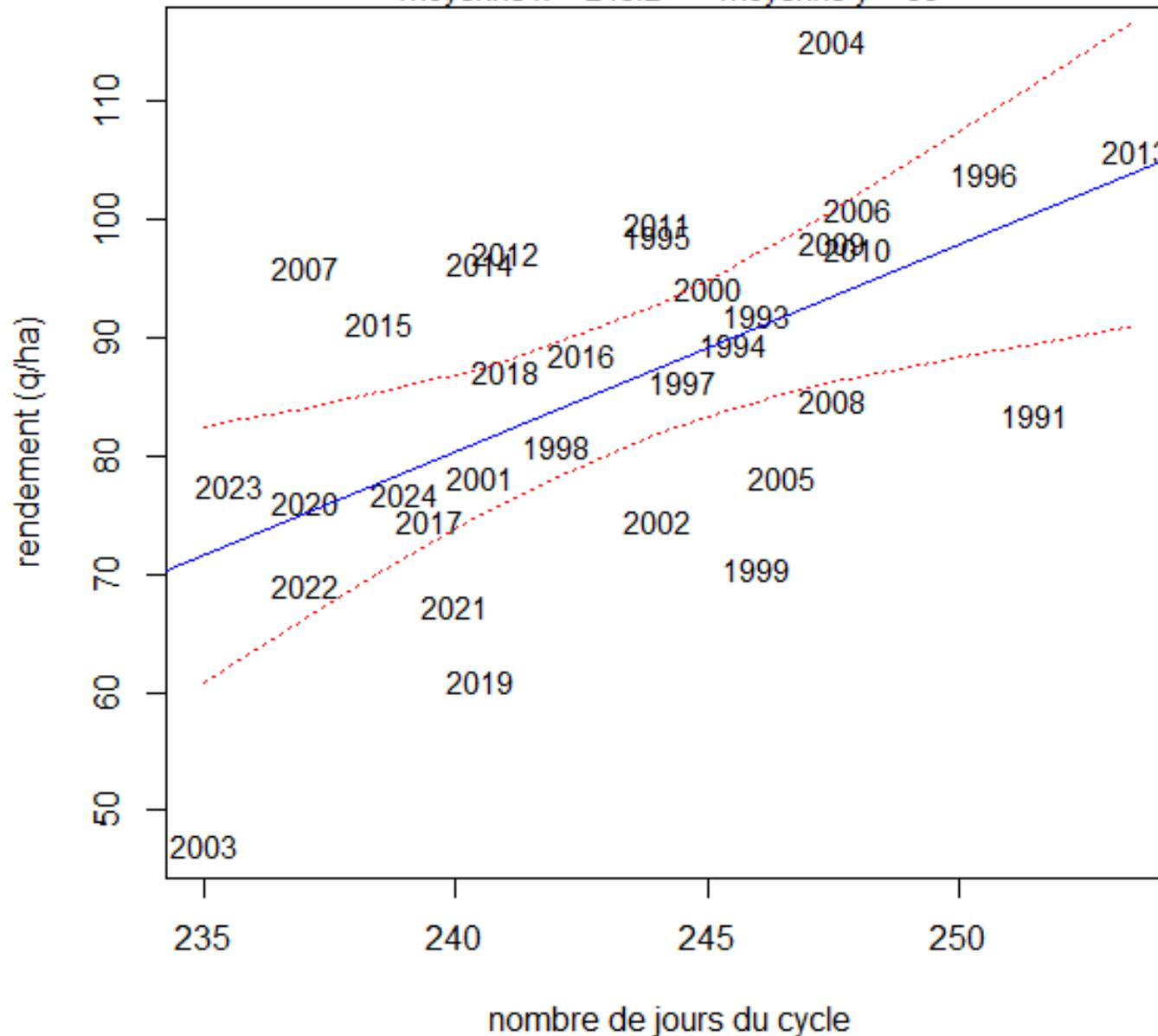
EVOLUTION DE LA DUREE DU CYCLE DE CAPPELLE
(semis le 31/10)



Le réchauffement climatique conduit à une diminution de la longueur du cycle
(-13 jours pour Nebraska et Cappelle).

RELATION ENTRE RENDEMENT ET DUREE DU CYCLE

effectif = 33 $y = -339.732 + x(1.75)$ $R^2 = 0.33$
moyenne x = 243.2 moyenne y = 86



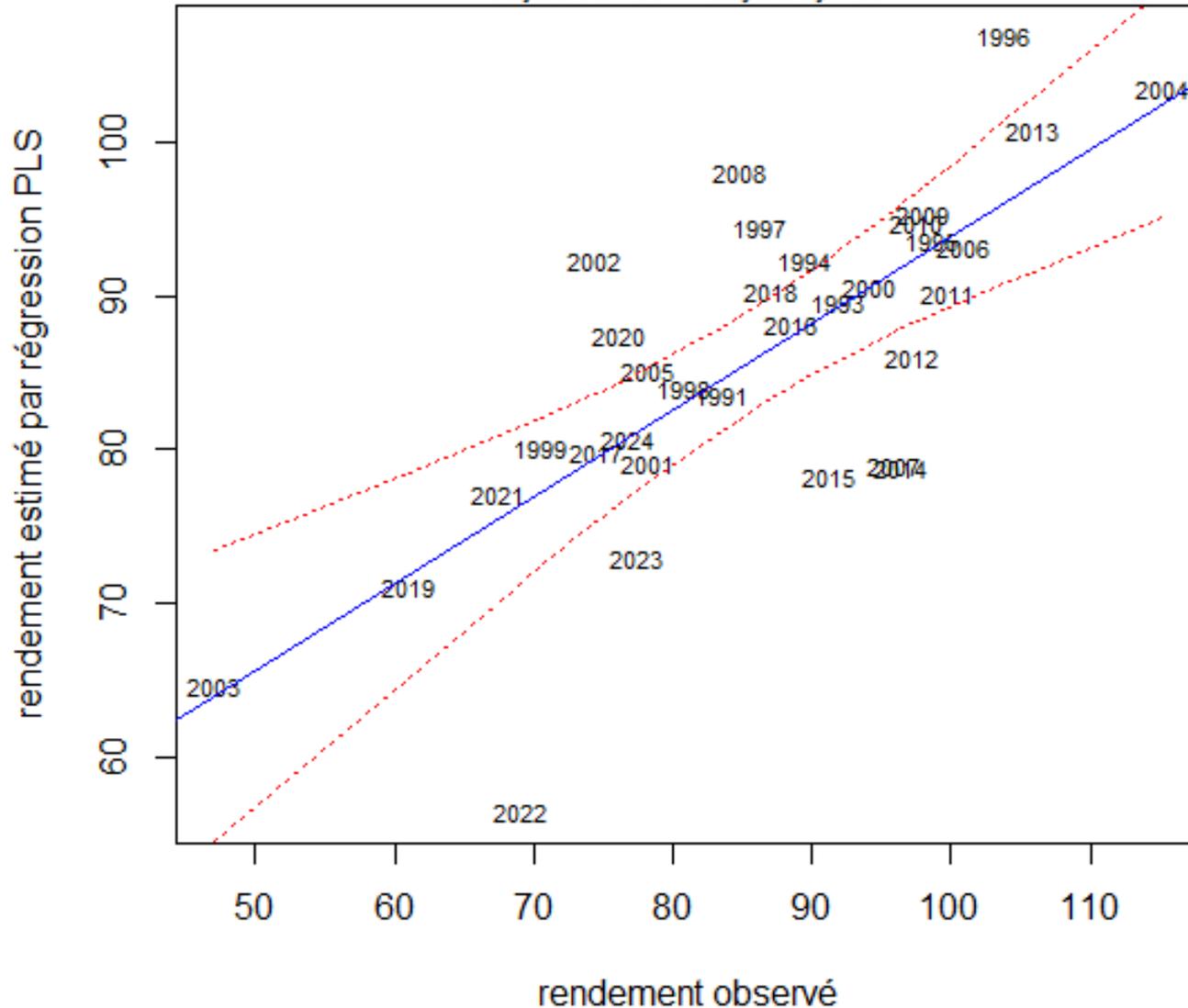
Pour Clermont-Ferrand, les données de rendement sont disponibles pour la période 1991-2024.

La durée du cycle explique 1/3 de la variabilité des rendements.

REGRESSION PLS

rendement = f(durée du cycle + autres variables climatiques)

effectif = 33 $y = 37.404 + x(0.565)$ $R^2 = 0.57$
moyenne x = 86 moyenne y = 86



En ajoutant les autres variables climatiques affectées par le changement climatique (ETP, RG et Tmoy cumulés sur le cycle + bilan P-ETP sur le cycle), on atteint 57% d'explication de la variabilité du rendement.

CONCLUSIONS

Chez le blé tendre, l'avancement des dates des stades phénologiques dû à l'élévation des températures, constitue un mécanisme d'évitement assez efficace par rapport aux effets du changement climatique.

Cependant :

- La réduction de la durée du cycle végétatif est liée à une diminution des rendements.
- Pour les températures échaudantes pendant le remplissage, on est sans doute en train d'atteindre les limites de ce mécanisme d'évitement.
- On se heurte rapidement à des contradictions : par exemple, gagner en précocité permet de réduire le risque de températures échaudantes,..., mais renforce le risque de gel d'épis en fin de montaison.

Depuis les années 90, la sélection ne fait que compenser la dégradation des conditions environnementales,..., et n'y parvient pas lorsqu'on cumule un grand nombre d'effets délétères comme en 2016 et 2024.