

Conséquences du changement climatique sur l'irrigation de cultures maraîchères choisies

Jana Zinkernagel

13.11.2025

www.hs-geisenheim.de

Le défi de l'irrigation dans la culture maraîchère

- **Exigences élevées** en matière d'approvisionnement en eau pour une **qualité élevée des produits**
- **Grande sensibilité** aux conditions environnementales extrêmes telles que **des températures élevées**
- Besoins en eau **élevés et en augmentation**



Flétrissures sur laitue pommée en cas de forte transpiration

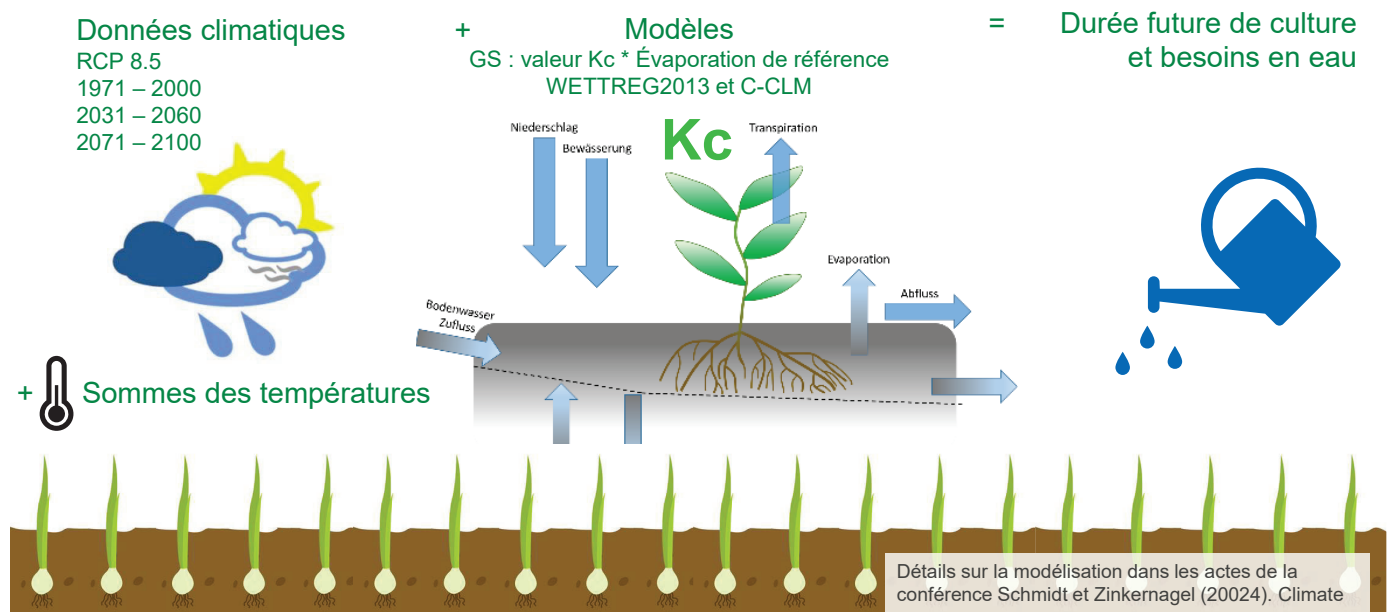
Image : pflanzenschutzdienst.rp-giessen.de/

Culture	Besoins en eau (mm)	Changements par rapport à 1961-1990 (mm)
...		
Poireaux précoces	236	+58
Courgettes précoces	203	+39
Oignon, été	168	+48

Zinkernagel et al., 2022. Berichte über Landwirtschaft 100/2

1. Comment le **changement climatique** modifie-t-il les **besoins en irrigation** ?
2. La gestion actuelle **de l'irrigation** est-elle adaptée à cette situation ?
3. Quelles sont les **options** pour la **culture maraîchère à l'avenir** ?

1. Comment le changement climatique modifie-t-il les besoins en irrigation ? Simulations



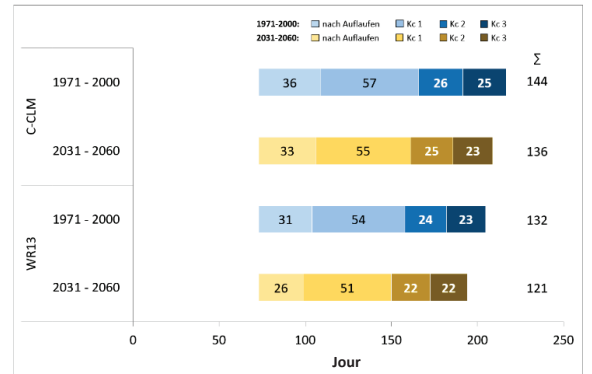
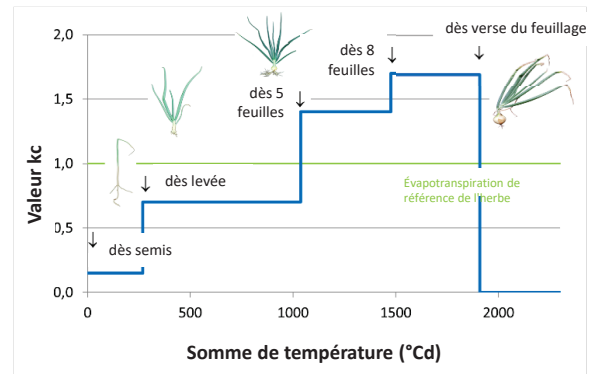
Accélération du développement des plantes, durée de culture

- spécifique aux stades de développement (Kc)

Prévoir le déroulement temporel des stades de développement à partir des sommes de températures

Une température plus élevée entraîne un raccourcissement de certains stades de développement

Les stades de germination ou de formation des feuilles (Kc 1) nécessitant une irrigation sont raccourcis de trois jours en moyenne



Le bilan hydrique climatique devient plus négatif

- différent selon les stades de développement

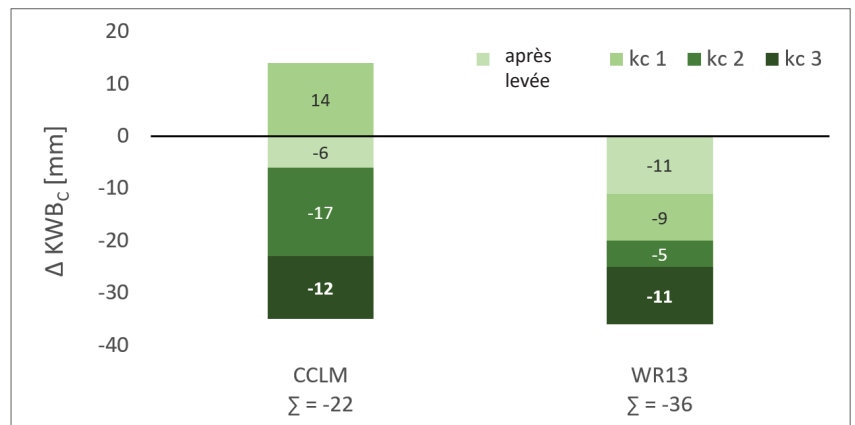
- Paramètres climatiques  et stades de développement (Kc)



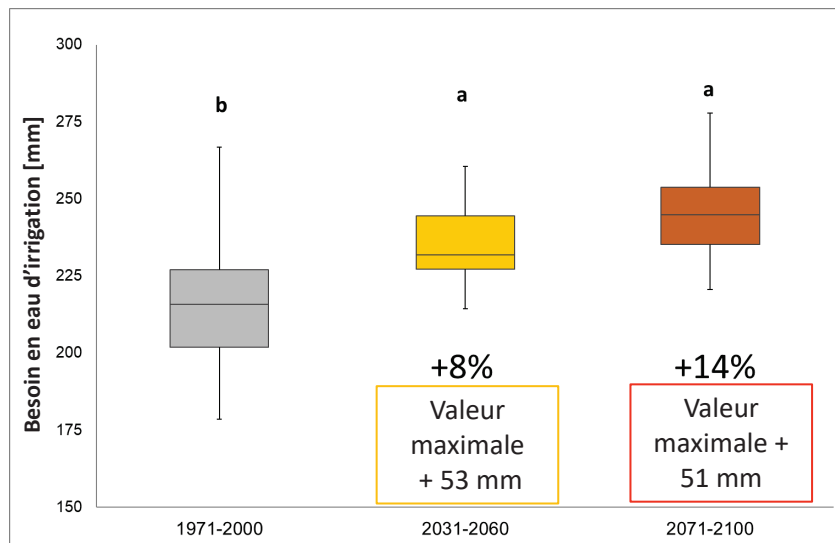
déterminent la quantité d'eau nécessaire

- Déficit hydrique différent selon les stades de développement
- Le raccourcissement de certains stades augmente leur vulnérabilité au manque d'eau : surtout en cas de périodes de sécheresse

Source : Schmidt et Zinkernagel, (2024). Climate



Les besoins en irrigation des oignons dans le Ried hessois augmentent - avec des valeurs extrêmes élevées



Moyenne sur 30 ans des besoins en eau supplémentaires des oignons dans le Ried hessois simulée en deux périodes futures pour RCP 8.5 avec WETTREG2013
a, b, c : les comparaisons significatives des moyennes selon Tukey ($\alpha=0,05$) au sein d'un modèle et d'un scénario sont symbolisées par des lettres différentes

Développement plus rapide des cultures et besoins en eau plus élevés - Conséquences pour l'irrigation

En raison de la **plus grande sensibilité** des stades de développement **au manque d'eau**

- Intolérance au retard d'irrigation
- Besoin **d'un contrôle plus précis** de l'irrigation
- **Mesures d'irrigation rapides**

En cas de **cultures échelonnées**, menées en parallèle sur de petites surfaces :

- Irrigation **simultanée** nécessaire
- besoin **accru en eau**
- **Plus d'irrigation avec technique plus efficace**



2. La gestion actuelle de l'irrigation est-elle adaptée à cet effet ? Statu quo Technique d'irrigation

Arrosage par tuyaux, installation fixe

- Parallélisme élevé réalisable sur de petites parcelles grâce au **nombre élevé**
- Mauvaise répartition de l'eau
- besoin important en temps de travail
- ☞ Efficacité de l'utilisation de l'eau ↓



Image : www.riesner-pumpen.de/landwirtschaft/bewasserung/rohrberegnung

Machines d'irrigation mobiles avec enrouleurs + canon

- Utilisation simultanée sur de petites parcelles limitée en raison de la largeur de travail élevée et **petites flottes**
- Faible temps de travail et coûts fixes
- Mauvaise répartition de l'eau en cas de vent
- Besoins énergétiques élevés
- ☞ Efficacité hydrique et gestion spécifique par petite parcelle ↓



Image : Centre de compétences Mittelstand 4.0 Kaiserslautern / A. Sell

Gödeke et al., 2024. KTBL
S. Brimmers et H. Garming (2025)

UNIVERSITÉ DE GEISENHEIM

Jana.Zinkemagel@hs-gm.de

9

La gestion actuelle de l'irrigation est-elle adaptée ? Statu quo Technique d'irrigation

Machines d'irrigation mobiles avec chariots à buses

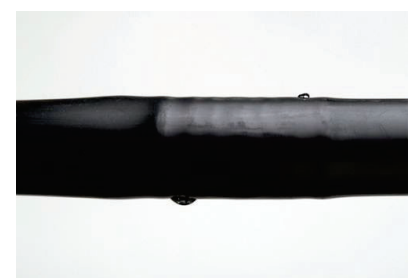
- Meilleure répartition et efficacité de l'eau en cas de vent
- Baisse de la consommation d'énergie
- nombreux passages pour de petits apports individuels
- ☞ Possibilité de spécification par parcelle et parallélisme ↓ en raison de coûts fixes plus élevés



Image : beinlich-beregnung.de

Irrigation goutte à goutte

- Efficacité élevée de l'eau
- Basse consommation d'énergie
- Besoin en main-d'œuvre très élevé
- Ne convient pas pour l'irrigation visant à garantir la qualité du produit, par exemple pour la laitue
- ☞ Parallélisme élevé, uniquement pour les cultures en rangs de longue durée



UNIVERSITÉ DE GEISENHEIM

Gödeke et al., 2024. KTBL
S. Brimmers et H. Garming (2025)

Jana.Zinkemagel@hs-gm.de

10

La gestion actuelle de l'irrigation est-elle adaptée ? Limites pour une utilisation future

- Parallélisme insuffisant de l'irrigation sur de nombreuses parcelles
- Utilisation excessive des ressources
- Répartition trop inégale de l'eau
- Faible automatisation



Machines d'irrigation avec enrouleurs + canon
Photo : Centre de compétences Mittelstand 4.0 Kaiserslautern / A. Sell



Arrosage par tuyaux
Image : www.riesner-pumpen.de/landwirtschaft/bewaesserung/rohrberegnung



Irrigation goutte à goutte



Machines d'irrigation avec chariots à buses
Photo : beinlich-beregnung.de

La gestion actuelle de l'irrigation est-elle adaptée ? Évaluation des besoins en eau

Futur système de contrôle de l'irrigation doit remplir les conditions suivantes :

- **Prévision plus précise** des événements d'irrigation : **date et quantité d'eau**
- Prise en compte des effets du changement climatique
→ **Prévisions : développement des plantes et conditions météorologiques**
- **facilité d'utilisation**
- **Automatisation de la détermination des besoins et de l'irrigation**

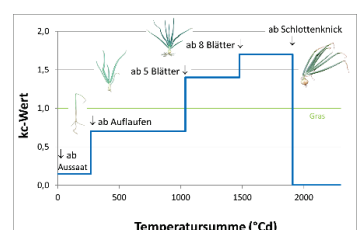
Décision courante dans l'exploitation



Capteurs d'humidité du sol



Pilotage «Geisenheimer»



Bilan hydrique climatique
<https://www.alb-bayern.de/>

3. Options pour la culture maraîchère future Technique d'irrigation

3. Options pour la culture maraîchère future Technique d'irrigation

en cas de modification des structures d'exploitation !?
Surface parcellaire > 50 ha

Investissement dans l'irrigation circulaire et linéaire
→ **Irrigation spécifique à certaines surfaces** pour une augmentation de

- la productivité hydrique de la technique $\left(\frac{\text{Rendement}}{\text{Unité d'eau d'irrigation}}\right)$
- productivité hydrique de la culture $\left(\frac{\text{Rendement}}{\text{Unité d'évaporation}}\right)$,
en combinaison avec un système de rétroaction par capteurs

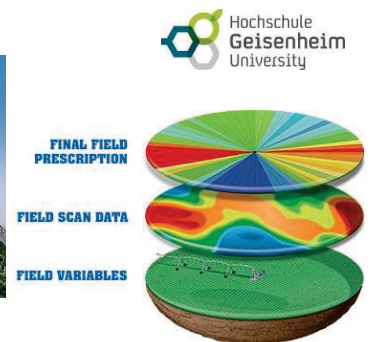
O'Shaughnessy et al. (2019) Biol. Sys. Eng.

avec les structures d'exploitation existantes

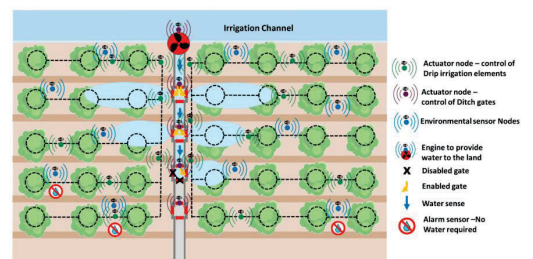
- Plus d'infrastructures à haute efficacité sur de petites parcelles



Image : www.lindsay.com/euas/de/beregnung



Irrigation spécifique à certaines zones avec pivot central
Image : Agricultural Instruction Inc., États-Unis



Irrigation goutte à goutte automatisée assistée par capteurs, spécifique à certaines zones Lloret et al. (2021) Sensors

Options pour la culture maraîchère future

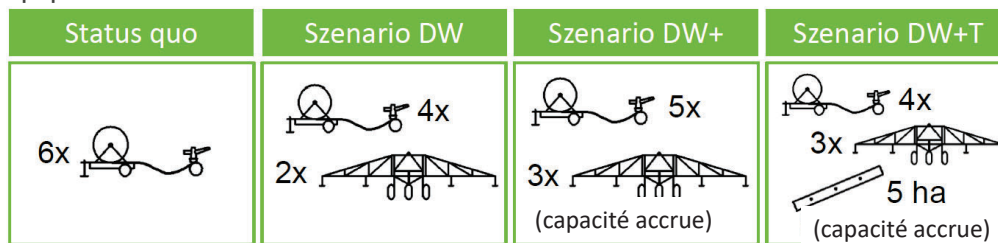
Limitation due aux coûts

Simulation des coûts liés à l'utilisation d'une technique d'irrigation plus efficace

- Structure d'exploitation représentative dans la région du Bas-Rhin :

laitue iceberg (14 ha)	mini laitue romaine (14 ha)	Chou pomme (14 ha)	Poireau (26 ha)
Surface de culture nette: 68 ha. Surface de culture totale: 117 ha			

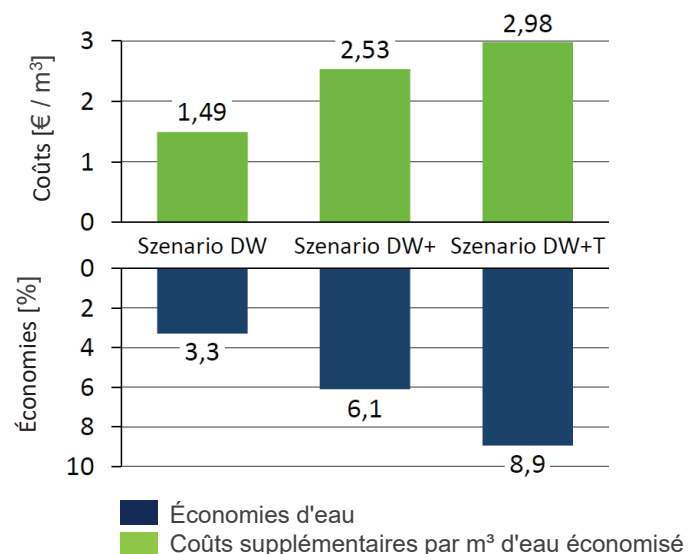
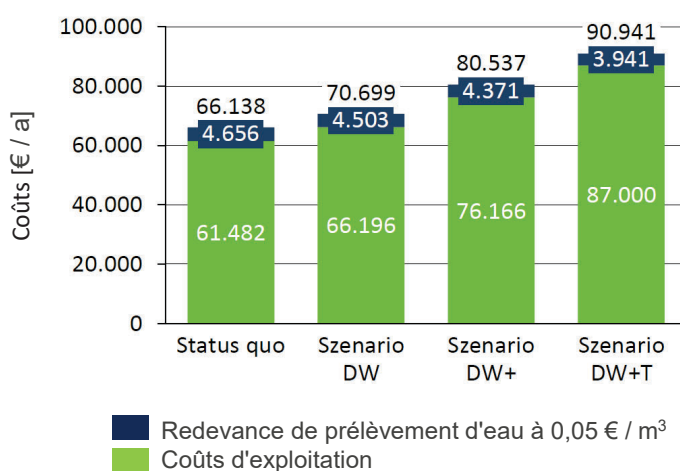
- Scénarios d'équipement



Brimmers et Garming (2025), DGG-Proceedings, en préparation

Options pour la culture maraîchère future

Technique plus efficace : les économies d'eau ont un coût élevé



Brimmers et Garming (2025), Actes de la DGG, en préparation

Options pour la culture maraîchère future
Détermination des besoins en eau

Systèmes basés sur des capteurs : réseaux de capteurs sans fil

a. faible consommation d'énergie :

- équilibre entre efficacité énergétique, qualité de mesure et fréquence de transmission

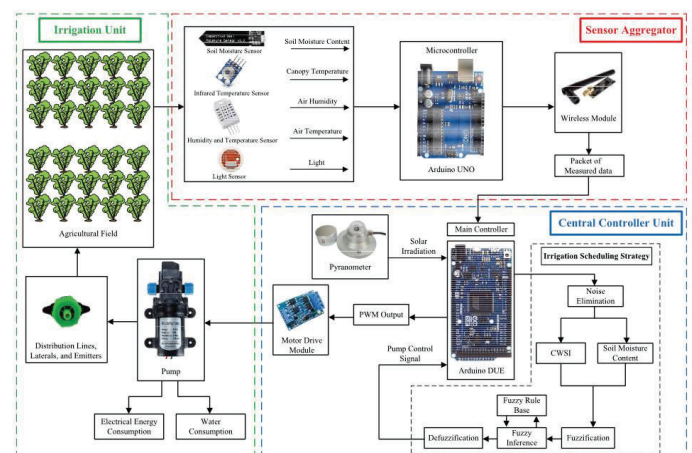
b. à faible coût :

- microprocesseurs bon marché avec microcontrôleurs radio
- Normes radio économes en données et en énergie (par exemple, ZigBee, www.csa-iot.org)

c. Utilisation de microcontrôleurs open source (par exemple : Arduino UNO R3, www.Arduino.cc)

- pour la mise en œuvre automatisée des recommandations d'irrigation

Unité de capteur sans fil
Pathan&Hate (2016)
Int.J.Eng.Res.&Tech.



Système intelligent de contrôle de l'irrigation avec des capteurs pédologiques, végétaux et climatiques économes en énergie et peu coûteux
Jamroen et al. (2020) IEEE

Options pour la culture maraîchère future

Détermination des besoins en eau

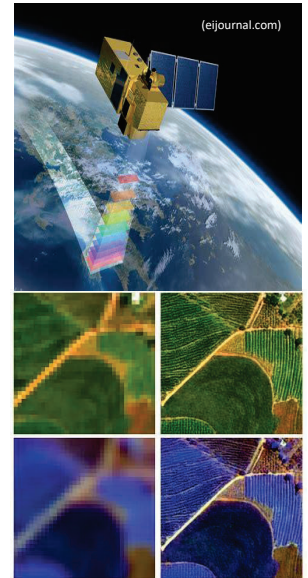
Systèmes basés sur le bilan hydrique climatique et des capteurs :

Remplacement de la saisie « manuelle » des stades Kc par des capteurs spectraux

- ✓ **Disponibilité** des données des images satellites (Sentinel-2) en open source
- ✓ **haute résolution temporelle et spatiale**, notamment grâce à des modèles d'**apprentissage automatique (ML)** : le modèle S2DR3 réduit toutes les bandes de Sentinel-2 à 3 m

Intégration de **capteurs** (sol, plante, climat) pour **l'entraînement des modèles ML**

- ✓ Sélection **du type et du nombre de capteurs nécessaires** pour la pratique de l'irrigation
- ✓ **Adaptabilité** grâce au ML à : différents types de sols, stades de développement et climats, intégration de différentes sources de données et évolutivité : parcelle - champ - exploitation
- ✓ **ANNI : Artificial Neural Network for Irrigation**
Rubo et Zinkernagel (2025). Agric. Water. Manag.



Modèle S2DR3 pour la reconstruction de textures haute résolution à travers les bandes spectrales des images Sentinel-2. Source : medium.com

Nécessité de modifier l'irrigation dans la culture maraîchère en raison du changement climatique

Conclusion

- Besoins en eau plus élevés et plus variables à court terme
- Vulnérabilité croissante face aux pénuries d'eau en raison de la diminution des précipitations estivales
- Techniques d'irrigation futures :
 - efficacité, parallélisme et réactivité accrus
 - Automatisation
- Détermination des besoins futurs en eau :
 - bases décisionnelles précisées par le changement climatique
 - Facilité d'utilisation et rentabilité
 - Connexion à la technique d'irrigation
- Les coûts liés à la gestion future de l'irrigation doivent être soutenables
- Recherche et développement pour les petites structures agricoles avec de nombreuses cultures et petites parcelles

Je me réjouis de votre discussion