

Répercussions du changement climatique sur la culture du maïs en Suisse

Annelie Holzkämper et Jürg Fuhrer

Agroscope, Institut des sciences en durabilité agronomique IDU, 8046 Zurich, Suisse

Renseignements: Annelie Holzkämper, e-mail: annelie.holzkaemper@agroscope.admin.ch



Avec le changement climatique, le potentiel de rendement du maïs sur le Plateau est de plus en plus limité par le stress dû à la chaleur et par l'accélération du développement phénologique. (Photo: Gabriela Brändle, Agroscope)

Introduction

Le changement climatique contraint l'agriculture à s'adapter afin de minimiser les risques et de tirer parti des nouvelles opportunités (OFAG 2011). Étant donné les incertitudes des projections climatiques, il est difficile de prévoir leurs répercussions et d'établir un ordre de priorité dans les mesures à prendre. C'est pourquoi il est nécessaire de prendre des dispositions solides pour augmenter la résilience des systèmes de culture aux changements climatiques. Le choix du site et de la variété en fait partie. Ce choix doit être adapté en fonction de l'évolution de l'aptitude climatique. Les tendances de l'aptitude climatique du territoire suisse à la culture du blé et du maïs au cours des dernières dizaines d'années ont déjà été documentées (Holzkämper *et al.* 2015). Le travail ici présenté analyse les modifications futures de l'ap-

titude climatique suite aux changements de températures sur l'ensemble du territoire en prenant l'exemple du maïs. Cette étude avait également pour objectif de déterminer, pour chaque site, l'évolution de l'importance des différents facteurs climatiques.

Matériel et méthodes

Données climatiques

L'évaluation régionale de l'aptitude climatique actuelle se base sur les données matricielles de températures et de précipitations de MétéoSuisse pour la période 1983–2010 (Frei et Schär 1998; Frei *et al.* 2006; MétéoSuisse 2012). Les données de rayonnement global proviennent de MétéoSuisse pour 2004–2010 (Stöckli 2013) et de CM SAF pour 1983–2003 (Satellite Application Facility on Climate Monitoring, Posselt *et al.* 2012). L'ap-

tude climatique des sites sélectionnés a été évaluée à partir des données des stations du réseau de mesures de MétéoSuisse.

Scénarios climatiques

Les modifications dans l'aptitude climatique ont été calculées sur la base des données matricielles de changement de la température moyenne du C2SM (Center for Climate Systems Modeling, EPF Zurich; Zubler *et al.* 2014). Cette série de données comprend des valeurs pour chaque jour de l'année avec une résolution d'environ deux kilomètres pour l'ensemble de la Suisse. Les changements de précipitations sont fournis à la même échelle, mais ne sont pas directement reliés aux changements de températures. C'est pourquoi seuls les changements de températures, dérivés des vingt chaînes de modèles climatiques (et représentés ici par la médiane des changements par rapport à la référence 1983–2010) ont été pris en compte pour trois horizons temporels (2020–2049, 2045–2074 et 2070–2099) basés sur le scénario d'émissions A2. Ce scénario repose sur l'hypothèse d'une hausse de la population mondiale et sur l'utilisation de sources d'énergie fossiles et par conséquent sur une forte augmentation des gaz à effet de serre (scénario *business-as-usual*, GIEC 2007).

Pour certains sites, il a été possible de combiner les changements de températures aux changements de précipitations. Pour ce faire, les chercheurs ont utilisé les projections issues de dix chaînes de modèles climatiques (Fischer *et al.* 2011; Bossard *et al.* 2011). Les changements saisonniers sont représentés à la figure 1 pour Zurich-Reckenholz et Changins. Le scénario RCP3PD a également été pris en compte ici. Il repose sur l'hypothèse d'une réduction des émissions de gaz à effet de serre de 50 % d'ici 2050 (van Vuuren *et al.* 2012).

Evaluation de l'aptitude climatique

L'aptitude climatique à la culture du maïs a été évaluée à l'aide d'une méthode développée récemment (Holzkämper *et al.* 2013; fig. 2). Elle est basée sur la répartition du cycle de croissance en quatre phases: (i) du semis à la levée, (ii) de la levée au début de la floraison, (iii) phase

Résumé ■ Le réchauffement planétaire modifie les conditions de la production végétale. Ces modifications ont été analysées pour l'ensemble du territoire suisse, en prenant l'exemple de l'aptitude climatique à la culture du maïs. L'étude s'est basée sur des données matricielles¹ de changements de températures pour trois horizons temporels (2020–49, 2045–74, 2070–99), provenant de vingt chaînes de modèles climatiques disponibles pour le scénario d'émissions A2 (scénario *business-as-usual*). Avec le réchauffement climatique, la surface adaptée à la culture augmente dans les zones d'altitude, tandis qu'elle diminue à long terme dans les zones de basse altitude. Cette étude analyse également l'influence des différents facteurs climatiques sur l'aptitude climatique à partir de scénarios combinés de températures et de précipitations issus de dix chaînes de modèles pour les sites de Zurich-Reckenholz et de Changins. Le stress dû à la chaleur et l'accélération du développement des plantes limitent de plus en plus l'aptitude climatique sur les deux sites, tandis que les perturbations liées à la sécheresse pendant la phase de maturation n'augmentent nettement que sur le site romand. A noter cependant que le décalage dans le temps du développement des plantes joue aussi un rôle, le risque de stress causé par la sécheresse pouvant être réduit par le raccourcissement des phases de croissance. En dépit des incertitudes relatives à l'évolution du climat à long terme, les résultats de cette étude fournissent des indications pour planifier le choix des sites et des variétés en tant que mesure d'adaptation à l'évolution du climat.

¹Données interpolées spatialement avec une grille de résolution d'env. 2 km.

Tableau 1 | Sommes de températures (température de base = 6 °C) utilisées pour simuler la phénologie du maïs-grain et dates moyennes de début des différents stades basées sur les données climatiques de 15 stations du Plateau pour la période 1981–2010 (Holzkämper *et al.* 2013)

Stades phénologiques	Somme des températures en degrés-jours	Dates moyennes de début du stade
Levée	100	~ 18 mai
Début de la floraison	800	~ 24 juillet
Fin de la floraison	1100	~ 15 août
Maturité	1600	~ 11 octobre

Tableau 2 | Facteurs climatiques servant à déterminer les limitations spécifiques aux phases pour le maïs-grain

Facteur	Description	Unité
Gel	moyenne $T_{\min} < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$	[$^\circ\text{C}$]
Température de croissance	Température journalière moyenne T_{mean}	[$^\circ\text{C}$]
Stress dû à la chaleur	Température journalière maximale moyenne $T_{\text{max}} > 35 \text{ } ^\circ\text{C}$	[$^\circ\text{C}$]
Stress dû au manque d'eau	Quantité moyenne d'eau disponible par jour (= Quantité de précipitations - ET_0)	[mm]
Rayonnement	Rayonnement global moyen journalier	[MJ m ²]
Durée de phase	phénologique	[nombre de jours]

ET_0 = Evaporation de référence selon Priestley-Taylor.

de floraison et (iv) phase de maturation. Le début de ces phases est déterminé de manière dynamique par la somme des températures (tabl. 1). La date de semis est également déterminée dynamiquement dans une période définie (du 15 avril au 31 mai); le semis a lieu quand la température moyenne des dix derniers jours dépasse $12 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Dans chaque phase, six facteurs climatiques pouvant limiter l'aptitude climatique sont pris en compte (tabl. 2). En ce qui concerne la température de croissance, le manque d'eau et la longueur des phases, la plage optimale des valeurs peut soit être dépassée, soit ne pas être atteinte. La dépendance de l'aptitude climatique par rapport à ces facteurs est représentée par des fonctions prenant des valeurs comprises entre 0 et 1 (fig. 2). Ces

fonctions d'aptitude factorielle sont décrites par Holzkaemper *et al.* (2013). Les limites des courbes de ces fonctions ont été définies à partir de données issues de la littérature et du savoir des experts. Pour obtenir l'aptitude climatique globale, les aptitudes factorielles spécifiques aux phases ont été agrégées en quatre valeurs d'aptitude par phase selon le principe du minimum. L'aptitude climatique globale a finalement été déterminée en établissant une somme pondérée sachant que dans le cas du maïs, chaque phase a le même poids. Cette méthode a permis d'obtenir un indice relatif de l'aptitude climatique [0–1]. Elle permet également de considérer non seulement l'aptitude climatique globale, mais aussi l'aptitude des facteurs spécifique aux phases, notamment les limitations climatiques.

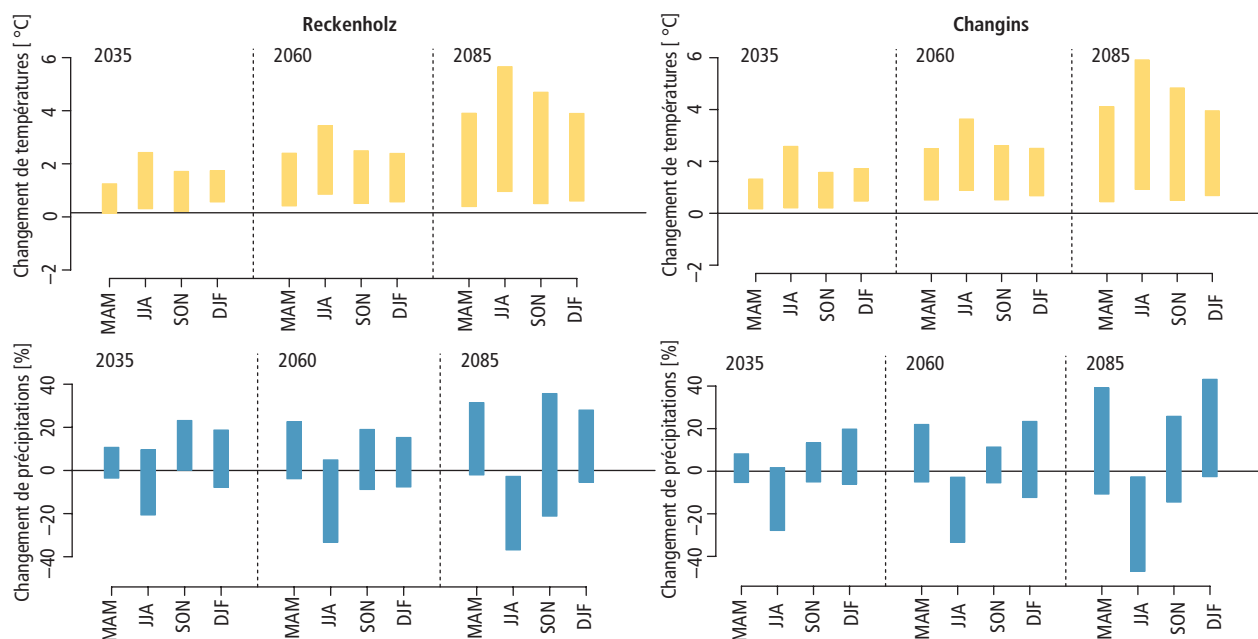


Figure 1 | Changements saisonniers de températures et de précipitations sur les sites de Zurich-Reckenholz et de Changins. Les histogrammes symbolisent la fourchette des changements pour toutes les chaînes de modèles et scénarios d'émissions (MAM = mars, avril, mai; JJA = juin, juillet, août; SON = septembre, octobre, novembre; DJF = décembre, janvier, février).

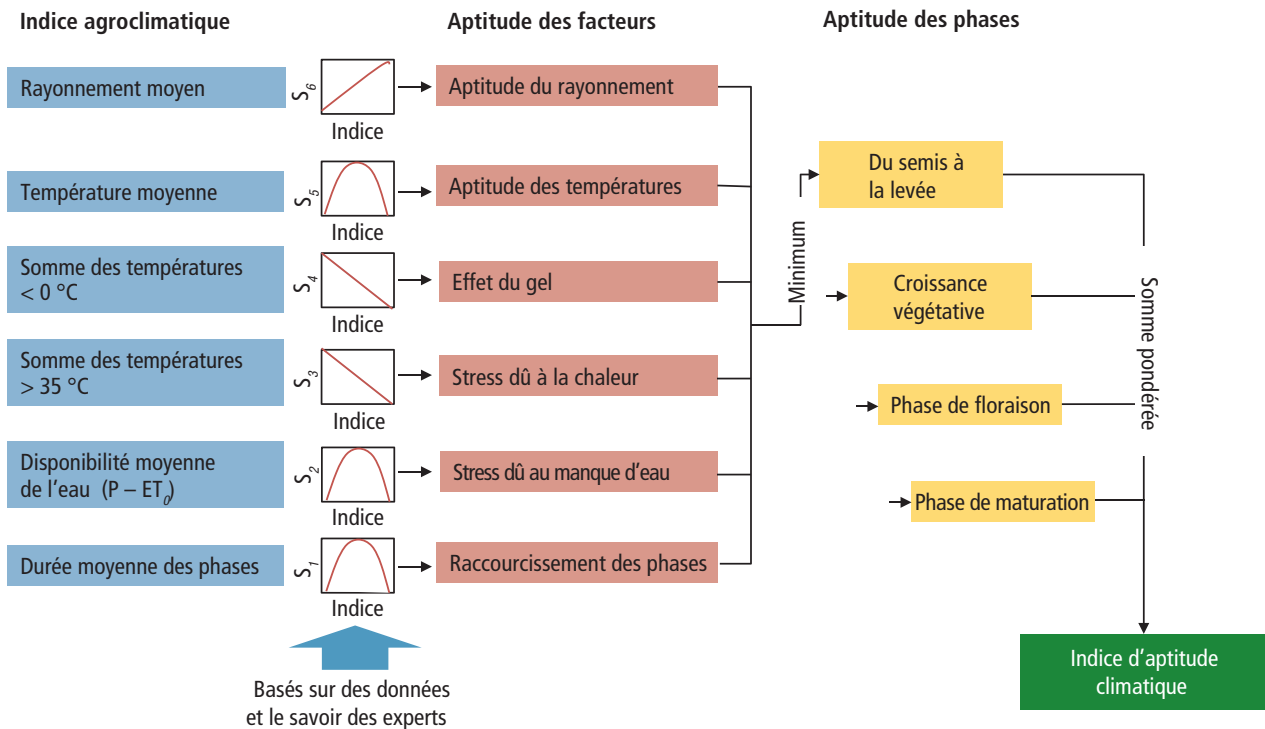


Figure 2 | Déduction de l'aptitude climatique à partir de six indices agro-climatiques calculés pour quatre phases phénologiques (P = précipitations; ET_0 = Evaporation de référence selon Priestley-Taylor; S_{1-6} = Indices d'aptitude factorielle).

Résultats

Déplacement géographique de l'aptitude climatique

La répartition de l'aptitude climatique à la culture du maïs-grain dans les conditions actuelles et les changements pour les trois périodes temporelles à venir (2020–2049, 2045–2074 et 2070–2099) ont été déduits des changements de températures (fig. 3). Les cartes montrent comment la zone de culture dont les conditions climatiques sont appropriées évoluera à l'avenir avec la hausse des températures dans l'hypothèse du scénario d'émissions A2. Les zones de pente supérieure à 15 % n'ont pas été prises en compte. Il résulte de l'étude un déplacement des régions bien adaptées. Dans les basses régions du Plateau, où est cultivée la majorité du maïs-grain actuellement, il faut s'attendre à une baisse parfois importante de l'aptitude climatique avec la poursuite du réchauffement climatique.

Changement de l'importance des facteurs climatiques

Le changement de l'importance relative des différents facteurs climatiques pour l'aptitude climatique a été étudié sur les sites de Zurich-Reckenholz et de Changins. Contrairement à l'analyse réalisée sur l'ensemble du ter-

ritoire, les stations climatiques concernées ici disposaient de scénarios combinés pour les températures et les précipitations. Sur les deux sites, les changements des limitations par la chaleur et par un raccourcissement de la durée des phases sont la cause de la baisse de l'aptitude climatique, comme le montre la figure 4 pour le scénario A2. Sur le site romand, les changements du volume des précipitations se traduisent par une augmentation du stress dû au manque d'eau pendant la phase de maturation, mais par une réduction de ce stress durant la croissance végétative et la phase de floraison. A Zurich-Reckenholz, les changements dans la fréquence à laquelle le stress dû à la sécheresse est un facteur limitant sont moins marqués. Sur les deux sites, la baisse du stress dû à la sécheresse est liée au décalage des phases phénologiques: suite à l'accélération du développement phénologique, les phases sensibles comme la période de floraison débutent plus tôt, c'est-à-dire à un moment où la sécheresse est encore moins prononcée. Ce décalage dans le temps réduit l'influence de la disponibilité limitée de l'eau et donc du stress dû à la sécheresse. L'opposition de ces deux effets apparaît également dans le fait que les changements des limitations par la sécheresse restent relativement semblables sur les trois périodes, >

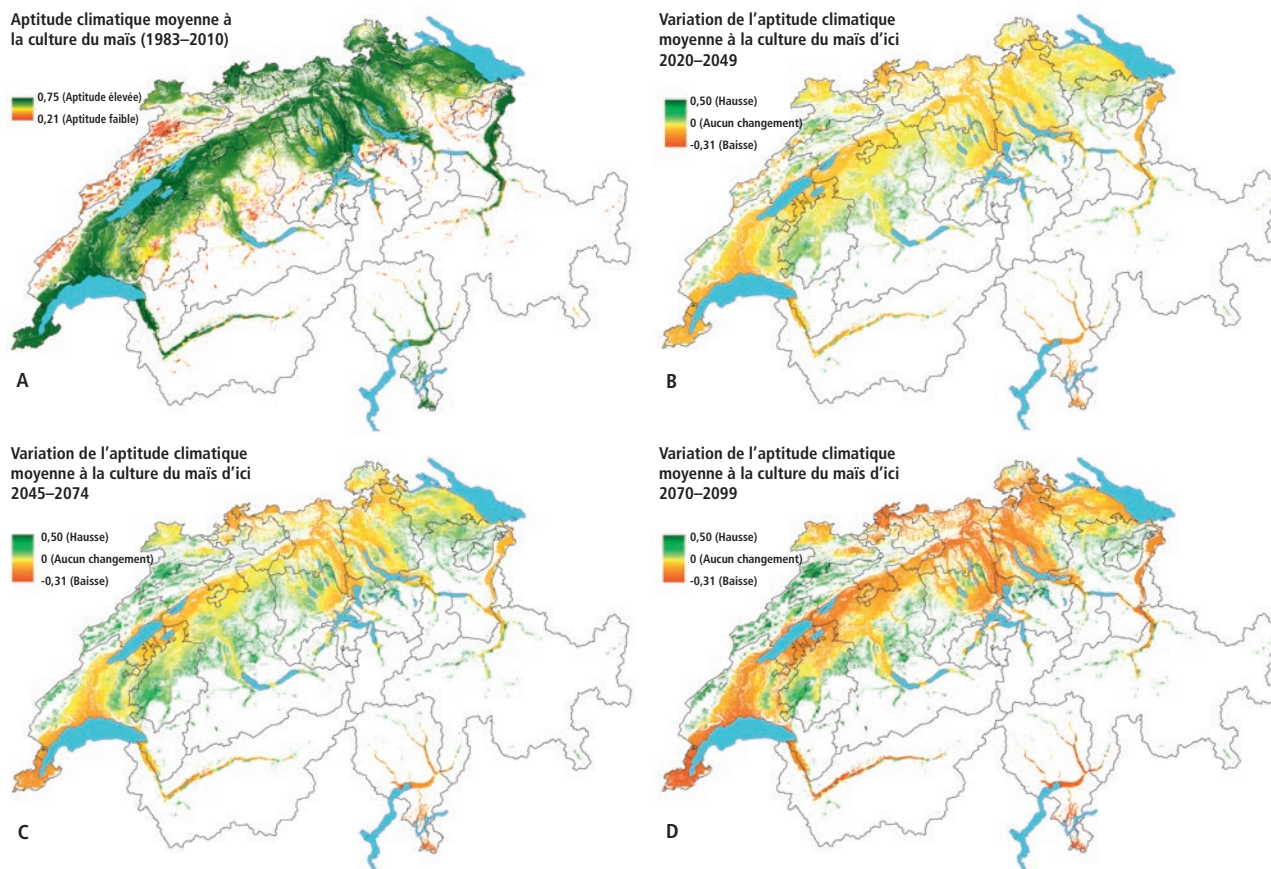


Figure 3 | Cartes de l'aptitude climatique actuelle à la culture de maïs-grain (A) (1983–2010, extrait de Holzschläger *et al.* 2015) pour les trois horizons temporels 2020–49 (B), 2045–74 (C) et 2070–99 (D) calculée sur la base des médianes des changements de températures à partir des 20 chaînes de modèles climatiques pour le scénario d'émissions A2. Les surfaces de pente > 15 % sont exclues.

bien que les changements de températures et de précipitations deviennent de plus en plus forts. Le décalage dans le temps apparaît en revanche plus nettement dans les limitations croissantes par le stress dû à la chaleur et par l'accélération du développement phénologique (raccourcissement des phases). La tendance de ces changements est la même dans les deux scénarios d'émissions, mais ils sont nettement plus prononcés dans le cas du scénario A2 moins favorable que dans le cas du scénario modéré RCP3PD (non représenté ici).

Discussion

Les effets positifs de la récente hausse des températures sur l'aptitude climatique à la culture du maïs (Holzschläger *et al.* 2015) devraient certes encore augmenter dans un premier temps en raison du réchauffement futur sur le Plateau suisse, mais ils devraient diminuer à long terme. En effet, les limitations par le stress dû à la chaleur augmenteront et pourront entraîner des baisses de rendements à cause de l'accélération du développement des cultures. Dans cette analyse, les changements de pré-

cipitations n'ont qu'une influence limitée sur le stress dû à la sécheresse ou à l'humidité, du fait d'un décalage des phases dû aux températures. On peut cependant supposer que si les températures sont plus élevées, un changement s'opérera vers des variétés ayant besoin de davantage de chaleur et que les phases phénologiques se décaleront ainsi de manière moins marquée. Cela veut dire que le risque de stress estival dû à la sécheresse est susceptible d'augmenter davantage que ce qui a été montré ici.

L'amélioration de l'aptitude climatique à moyen terme suite au réchauffement planétaire permettra peut-être de développer la culture du maïs dans différentes régions. Cependant, délocaliser la culture vers les régions d'altitude n'est que modérément réaliste étant donné la pente croissante du terrain, de moins en moins favorable à la culture. D'autre part, la qualité du sol peut être insuffisante dans de telles régions. Le fait que la méthode appliquée ne tienne pas compte des propriétés du sol représente également une restriction, car l'interaction entre le sol et le climat est importante pour le stress lié à la sécheresse.

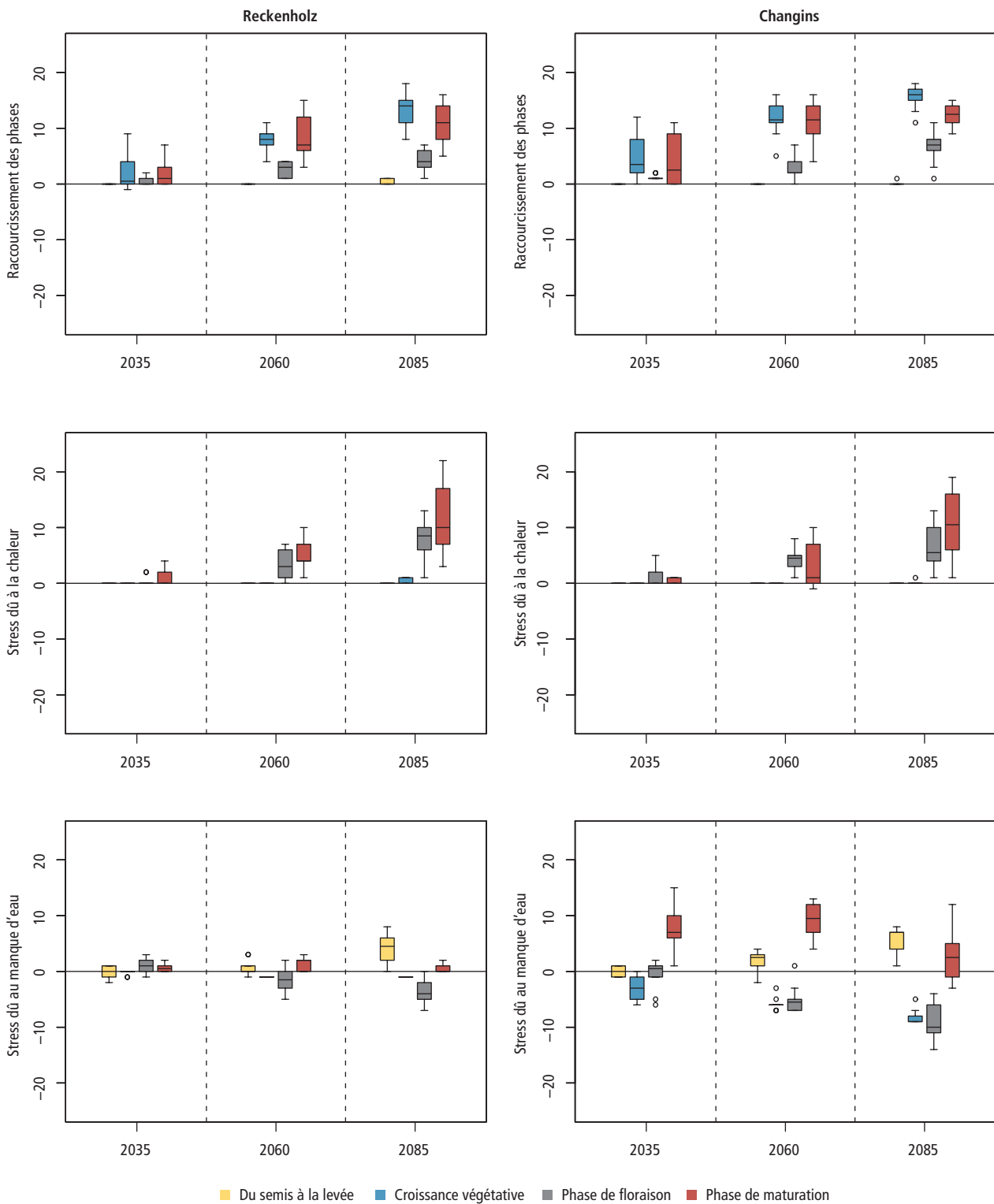


Figure 4 | Changements dans la fréquence des limitations les plus fortes dans chaque phase phénologique pour les trois horizons de projection pour le scénario d'émissions A2. Les boxplots indiquent les fourchettes d'incertitude (boxplot avec médiane, percentiles 25/75 % et 5/95 %) à partir de dix chaînes de modèles climatiques.

Les changements des limitations factorielles qui apparaissent dans les projections indiquent quelles mesures d'adaptation prendre et où pour contribuer à réduire les risques de perte de rendement. Pour faire face à la hausse du stress dû à la chaleur et à la sécheresse, une irrigation accrue serait une mesure d'urgence notamment sur le Plateau occidental, ce que corroborent les résultats d'autres études (Fuhrer *et al.* 2014). Le choix de variétés résistantes à la chaleur et à la sécheresse peut également contrer les risques inhérents au climat. Des variétés ayant besoin de chaleur peuvent réduire l'effet limitant du facteur climatique dû à un développement accéléré. Par ailleurs, le décalage de la date de semis aide à mieux tirer parti de l'allongement de la période de croissance (Torriani *et al.* 2007), voire permet de mettre en place une culture estivale supplémentaire. Relevons toutefois que les scénarios climatiques disponibles ne prennent pas en compte l'hypothèse d'un changement dans le rayonnement global, qu'ils ne prévoient que de légers changements de température et de précipitations et aucune modification de leur variabilité. Si les extrêmes climatiques comme la sécheresse et la canicule se font de plus en plus fréquents, comme le montrent des études récentes (notamment Fischer et Knutti 2015), l'augmentation de la variabilité climatique pourrait amoindrir la stabilité des rendements.

Conclusions

Les résultats de l'étude apportent des éléments pour planifier le choix du site et des variétés en tant que mesure d'adaptation au changement climatique. Toutefois, les répercussions du changement climatique dépendent des chaînes de modèles et aussi – plus les projections sont faites à long terme – du scénario d'émissions. La planification de l'adaptation doit tenir compte autant que possible de ces incertitudes. Cela signifie que les mesures prises doivent être robustes vis-à-vis des incertitudes connues et qu'elles devraient augmenter la résilience climatique en général. Concrètement, cela peut notamment signifier: préserver la plus grande diversité génétique possible, créer des réservoirs d'eau pour l'irrigation ou maintenir les propriétés du sol pour assurer un cycle favorable de l'eau et des éléments nutritifs. Enfin, une approche adaptative peut aider à tenir compte de nouvelles incertitudes dans la planification, en contrôlant régulièrement l'efficacité des mesures prises et lorsque c'est possible en modifiant leur application. ■

Bibliographie

- Bosshard T., Kotlarski S., Ewen T. & Schär C., 2011. Spectral representation of the annual cycle in the climate change signal. *Hydrology and Earth System Sciences* **15**, 2777–2788.
- Fischer A.M., Weigel A.P., Buser C.M., Knutti R., Künsch H.R., Liniger M.A., Schär C. & Appenzeller C., 2011. Climate change projections for Switzerland based on a Bayesian multi-model approach. *International Journal of Climatology*, Advance online publication.
- Fischer E.M. & Knutti R., 2015. Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes. *Nature Climate Change* **5**, 560–564.
- Frei C. & Schär C., 1998. A precipitation climatology of the Alps from high-resolution rain-gauge observations. *International Journal of Climatology* **18** (8), 873–900.
- Frei C., Schöll R., Fukutome S., Schmidli J. & Vidale P.L., 2006. Future change of precipitation extremes in Europe: Intercomparison of scenarios from regional climate models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **111** (D6), 1–22.
- Fuhrer J., Tendall D., Klein T., Lehmann N. & Holzkämper A., 2013. Water demand in Swiss Agriculture – Sustainable Adaptive Options for Land and Water Management to Mitigate Impacts of Climate Change. *ART-Schriftenreihe* **19**, 56 p.
- Holzkämper A., Calanca P. & Fuhrer J., 2013. Identifying climatic limitations to grain maize yield potentials using a suitability evaluation approach. *Agricultural and Forest Meteorology* **168**, 149–159.
- Holzkämper A., Fossati D., Hiltbrunner J. & Fuhrer J., 2015. Spatial and temporal trends in agro-climatic limitations to production potentials for grain maize and winter wheat in Switzerland. *Regional Environmental Change* **15** (1), 109–122.
- IPCC, 2007. Climate Change 2007 – The Physical Science. Intergovernmental Panel on Climate Change, Genève. 996 p.
- MétéoSuisse, 2012. Documentation of MeteoSwiss grid-data products: Daily mean, minimum and maximum temperature: TabsD, TminD, TmaxD. Available from www.meteosuisse.ch.
- OFAG, 2011. Stratégie Climat pour l'agriculture. Office fédéral de l'agriculture, Berne. 46 p.
- Posselt R., Müller R., Trentmann J. & Stöckli R. 2012. Remote sensing of solar surface radiation for climate monitoring – the CM-SAF retrieval in international comparison. *Remote Sensing of Environment* **118**, 186–198.
- Stöckli R., 2013. The HelioMont Surface Solar Radiation Processing, *Scientific Report MeteoSwiss* **93**, 122 p.
- Torriani D.S., Calanca P., Schmid S., Beniston M. & Fuhrer J., 2007. Potential effects of changes in mean climate and climate variability on the yield of winter and spring crops grown in Switzerland. *Climate Research* **34**, 59–69.
- Van Vuuren D.P., Edmonds J., Kainuma M. et al., 2011. The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change* **109**, 5–31
- Zubler E., Fischer A.M., Liniger M.A., Croci-Maspoli M., Scherrer S.C. & Appenzeller C., 2014. Localized climate change scenarios of mean temperature and precipitation over Switzerland. *Climatic Change* **125** (2), 237–252.

Riassunto**Impatto dei cambiamenti climatici sulla coltivazione di mais in Svizzera**

Il riscaldamento globale modifica i presupposti per la produzione agricola, aspetto che è stato qui studiato a livello nazionale per la Svizzera sulla base dell'idoneità climatica per il mais. A questo riguardo sono stati usati dati su griglia¹ relativi al cambiamento di temperatura per tre orizzonti temporali (2020–49, 2045–74, 2070–99), ricavati da venti catene di modelli climatici per lo scenario di emissione A2 (scenario «Business as Usual»). Con il riscaldamento climatico, la superficie adatta alla coltivazione si spinge ad altitudini più elevate, diminuendo, a lungo termine, a quelle più basse. In una seconda parte è stata studiata l'influenza di singoli fattori sull'idoneità climatica, partendo da scenari combinati di temperatura e precipitazione derivati, per le località di Zurigo-Reckenholz e Changins, da dieci catene di modelli del clima. Su entrambi i siti, lo stress da calore e uno sviluppo accelerato delle piante limitano progressivamente l'idoneità climatica, mentre i danni da siccità durante la maturazione aumentano notevolmente solo per la località della Svizzera occidentale. A questo proposito occorre tuttavia tener conto dello slittamento temporale dello sviluppo delle piante, in quanto il raccorciamento delle fasi di crescita tende a diminuire il rischio di stress da siccità. Nonostante le incertezze sull'andamento del clima a lungo termine, i risultati di questo studio forniscono indicazioni per la pianificazione della scelta delle aree di produzione e delle varietà, quale misura di adattamento ai cambiamenti climatici.

¹Dati interpolati spazialmente con una griglia di risoluzione di ca. 2 km.

Summary**The impact of climate change on maize cultivation in Switzerland**

The premise that global warming changes the conditions for crop production was investigated throughout Switzerland on the basis of a climate suitability for grain maize cultivation. Gridded projections¹ of temperature changes for three time periods (2020–49, 2045–74, 2070–99) available from twenty climate-model chains for the A2 emissions scenario (i.e. the «business as usual» scenario) were used. It was found that with climate warming, the suitable production area increases at higher altitudes but decreases at lower altitudes in the longer term. In a second part of the study, we investigated the influence of individual climatic factors on climate suitability using combined temperature and precipitation scenarios from ten model chains for the Zurich-Reckenholz and Changins sites. Results suggest that heat stress and accelerated plant development are increasingly limiting climate suitability at both sites, whilst water shortage during maturation is only increasing significantly at the Changins site in western Switzerland. The shortening of growth phases also plays a role here, since the temporal shift in crop development can reduce the risk of drought stress if drought-sensitive phenological periods are shifted away from periods of most intense stress. Despite uncertainties with regard to long-term climate change, the results of this study can provide advice for the planning of possible climate change adaptation measures (i.e. future cultivar choice, shifts in production areas).

Key words: climate change, climate suitability, maize, adaptation.

¹Spatially interpolated data with a grid resolution of approx. 2 km.