

Changement climatique et production fourragère: à quoi faut-il s'attendre en 2050?

M. Meisser, A. Lüscher et E. Mosimann

Agroscope, Suisse

Contact: Marco Meisser, marco.meisser@agroscope.admin.ch

Résumé

Depuis le début des mesures systématiques (1864), la température en Suisse a augmenté de l'ordre de 1,8 °C, contre environ 1 °C en moyenne mondiale. Le changement climatique est marqué par la fréquence plus élevée d'évènements climatiques extraordinaires, dont l'origine anthropique ne fait plus aucun doute. Trois facteurs (élévation de la concentration de CO₂, augmentation des températures et modifications du régime hydrique) jouent un rôle majeur pour le développement et la croissance des végétaux, avec des effets qui peuvent être synergiques ou antagonistes. D'ici à 2050, les changements climatiques pour la Suisse pourraient se montrer globalement plutôt favorables pour la production végétale; du moins si l'augmentation de la température moyenne reste inférieure à 2–3 °C (en référence à 1990). L'un des principaux avantages attendus est l'allongement de la période de végétation. Les épisodes de sécheresse, la prolifération de plantes indésirables ou encore les stress de chaleur pour les animaux représentent en revanche les principaux effets néfastes. Pour pallier ces effets négatifs, mais aussi pour profiter des effets positifs, les systèmes herbagers devront s'adapter, en jouant sur la diversité et la complémentarité.

Principales évolutions du climat

Le changement climatique (CC) désigne un ensemble de phénomènes dont les plus connus sont l'élévation de la concentration de CO₂ et la modification de divers paramètres climatiques. L'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère (forçage radiatif) est responsable du réchauffement, qui atteint actuellement près de 1 °C au niveau du globe. En Suisse, le réchauffement est plus marqué; il s'élève à environ 1,8 °C, depuis les premières mesures en 1864 (Académies suisses des sciences naturelles, 2016). D'ici à 2060, le climat en Suisse devrait encore se réchauffer de 2 à 3 °C par rapport au climat de la période 1980–2009 (CH2011, 2011). C'est dans les Alpes que l'augmentation des températures sera la plus forte, du fait de la diminution de l'albédo résultant de la fonte des neiges. Le régime pluviométrique devrait également se modifier; c'est cependant le paramètre le plus délicat à estimer. Pour la Suisse, les modèles font état pour 2060 d'une diminution

moyenne de 10 à 17% des précipitations estivales, selon la région considérée (scénario A1B; CH2011, 2011). Mais, plus que les valeurs moyennes, c'est l'augmentation de la fréquence des événements météorologiques extraordinaires qui inquiète. S'il est difficile – à partir des événements extrêmes considérés isolément – d'établir un lien direct, cette tendance est bel et bien liée au changement climatique. Les dernières études permettent même de quantifier l'influence humaine dans cette évolution. Actuellement, 18% des épisodes de fortes pluies et 75% des vagues de forte chaleur peuvent être reliés au réchauffement d'origine anthropique (Fischer et Knutti, 2015). A l'avenir, ces pourcentages seront encore plus importants.

Effets physiologiques du changement climatique sur la végétation

Les émissions de gaz à effet de serre (GES) modifient plusieurs paramètres atmosphériques et climatiques. De très nombreux travaux ont été conduits ces dernières années; ils portent le plus souvent sur l'effet, combiné ou non, de l'élévation de la concentration de CO₂, du réchauffement et de la sécheresse sur le développement et la croissance des végétaux. Ces trois facteurs jouent un rôle majeur, avec des effets qui peuvent être synergiques ou antagonistes.

L'élévation de la concentration de CO₂ entraîne globalement des effets favorables pour la production végétale, à savoir une augmentation de l'activité photosynthétique, de même qu'une baisse de la conductance stomatique (Ainsworth et Long, 2005). Lorsque les concentrations de CO₂ sont élevées, la plante ferme partiellement ses stomates, ce qui lui permet de réduire sa consommation d'eau. L'efficacité de l'utilisation de l'eau (WUE, rapport entre la photosynthèse et l'évapotranspiration) est améliorée. Divers essais font également état d'une diminution de la Rubisco (enzyme impliqué dans le cycle de Calvin), ce qui conduit potentiellement à une diminution des teneurs en azote dans les tissus et à une augmentation du rapport C/N (Newman et al., 2003; Luo et al., 2006). La qualité du fourrage pourrait donc s'en trouver péjorée. Enfin, avec l'augmentation du CO₂, le pool de l'azote et la séquestration du carbone dans le sol augmentent (Luo et al., 2006).

Les essais avec enrichissement de CO₂ en plein air (essais FACE) ont montré d'importantes interactions entre la plante et le sol. L'augmentation des concentrations de CO₂ entraîne plus rapidement des limitations en azote. En dépit d'une baisse de la concentration critique en azote, l'indice de nutrition azotée [INN], qui exprime le niveau d'alimentation azoté, est plus bas chez les plantes soumises au gazage de CO₂ (Zanetti et al., 1998). Les augmentations de rendement liées à l'élévation du CO₂ dépendent donc fortement de l'alimentation en azote; elles sont plus marquées lorsque les conditions d'alimentation sont non limitantes (Poorter, 1998, Lüscher et al., 2004). En l'absence d'importants apports N, les teneurs en azote du fourrage sont plus basses et les

exportations plus faibles (Soussana et Lüscher, 2007). A cet égard, les légumineuses offrent une alternative intéressante pour pallier les possibles limitations en azote induites par l'élévation du CO₂. Ce groupe profite mieux que les graminées de l'augmentation de la concentration de CO₂, avec des gains de productivité plus importants et une hausse de la part d'azote provenant de la fixation biologique (Hebeisen et al., 1997; Zanetti et al., 1998).

Le réchauffement, tout comme l'élévation de la concentration de CO₂, favorise l'assimilation photosynthétique et la croissance des végétaux. Il entraîne en revanche une consommation d'eau accrue. En effet, la transpiration est le moyen par lequel la plante maintient la température des tissus dans des limites physiologiquement acceptables. Les légumineuses devraient davantage profiter que les graminées du réchauffement, car elles ont un optimum de température qui est plus élevé que celui des poacées. Globalement, si l'augmentation de la température moyenne d'ici à 2050 reste inférieure à 2–3 °C, les effets favorables du réchauffement devraient prédominer (OcCC / ProClim 2007). Au-delà de cette limite, les effets négatifs pourraient l'emporter, du fait notamment de l'augmentation importante des périodes de sécheresse et de cycles de végétation (chez les plantes) plus courts.

Le stress hydrique constitue le troisième phénomène important lié au CC. Pour y faire face, la plante ferme ses stomates. Elle réduit ainsi sa transpiration mais aussi sa croissance. La production de biomasse est d'ailleurs assez étroitement liée à l'évapotranspiration. Les plantes qui souffrent du manque d'eau sont de plus petite taille – le ralentissement de la croissance survient plus vite que la baisse de l'assimilation – et présentent des tissus plus denses (diminution de la SLA). Le renouvellement (turnover) des feuilles se fait plus lentement. Ces adaptations physiologiques permettent aux végétaux de réduire les pertes en eau et de ralentir leur métabolisme.

Effets de la sécheresse sur la production des prairies et des pâturages

Plus que toute autre culture, la production herbagère se caractérise par la variabilité de ses rendements (entre les sites mais aussi entre les années). Par rapport à une culture annuelle comme le maïs, dont les rendements varient relativement peu, la production des prairies et pâturages est très fortement impactée par les conditions climatiques, et notamment par l'approvisionnement en eau. Au cours de ces dernières années, de nombreux essais ont été conduits pour évaluer les réponses des communautés herbagères au manque d'eau.

Sur le plan agronomique, le premier effet de la sécheresse est une baisse de rendement. Lors des épisodes de sécheresse de 2003, la diminution de rendement des pâturages dans l'ouest de la Suisse était de l'ordre de 40% (Mosimann et al., 2012). En 2015, la production des surfaces herbagères en juillet et en août était inférieure d'environ 20 à 35%, comparativement à la moyenne pluriannuelle.

Cette baisse a été partiellement compensée par les bons rendements avant et après la sécheresse. Si l'on considère l'ensemble de la période de végétation, l'année 2003 reste clairement la plus sèche de ces dernières années. Les effets de la sécheresse dépendent du mode de gestion: les parcelles utilisées intensivement (caractérisées par un couvert plus ras) souffrent davantage du sec que les parcelles exploitées de manière plus extensive (Meisser et al., 2013).

La sécheresse peut également entraîner des changements de composition botanique. Alors que l'abondance des espèces peut fluctuer assez fortement au cours d'une période de végétation, la disparition et/ou l'apparition de nouvelles espèces (*turnover*) est généralement beaucoup plus lente et dépend notamment de la composition fonctionnelle de la prairie (Grime et al., 2000) et de sa capacité de régénération/recolonisation par les graines (Stampfli et Zeiter, 2004). Les effets de la sécheresse peuvent aussi s'exercer au travers de modifications dans la force de concurrence des espèces.

Au niveau de la communauté végétale, les changements qui s'observent à court terme lors d'une sécheresse concernent surtout les valeurs des traits fonctionnels. Les traits sont des caractéristiques morphologiques ou physiologiques mesurables à l'échelle de la plante. Ils influencent indirectement la performance des espèces par leurs effets sur la croissance, la reproduction ou la survie (Violle et al., 2007). La surface spécifique foliaire (SLA en anglais) ou la teneur en MS des limbes (LDMC en anglais) sont des exemples de traits. Les traits expriment non seulement des réponses aux changements des conditions du milieu (traits de réponse) mais ils déterminent également le fonctionnement de l'écosystème (traits d'effet), notamment les services agronomiques rendus par la prairie (Meisser et al., 2013). Agroscope a réalisé ces dernières années plusieurs essais qui ont bien mis en évidence l'importance de la variabilité fonctionnelle intraspécifique (Meisser et al., 2014; Deléglise et al., 2015). Ce mécanisme intervient bien plus fortement que le turnover des espèces (variabilité interspécifique) dans le processus d'adaptation des prairies. Ces mêmes essais ont montré que les herbages permanents étaient très résilients (aptitude d'un écosystème à revenir à son état initial après une perturbation).

Des changements de la valeur nutritive peuvent également survenir. Les prairies en situation de déficit hydrique modéré présentent souvent une valeur nutritive un peu supérieure à celles bien approvisionnées en eau (Mosimann et al., 2013; Grant et al., 2014). Ces différences peuvent être expliquées par un ralentissement de l'effet de « dilution » (Lemaire et Gastal, 1997). En effet, à mesure qu'augmente la formation de biomasse, les concentrations d'azote dans les plantes diminuent. Au cours de la croissance, les plantes investissent toujours davantage dans les tissus structurels (pauvres en azote) pour édifier l'architecture du végétal, au détriment du compartiment

cytoplasmique (riche en azote). Le stress hydrique, de par l'effet limitant qu'il exerce sur la croissance des plantes, provoque un ralentissement de ce phénomène de dilution. Dans le même ordre d'idée, les constituants pariétaux, et notamment la fraction ADF, tendent à diminuer légèrement (Dumont et al., 2015).

A l'inverse, lorsque le déficit hydrique est très sévère, on assiste à une baisse de la valeur azotée du fourrage, qui provient de la sénescence précoce des feuilles et/ou d'effets liés à la nutrition azotée des plantes (Buxton, 1996). Si l'assimilation diminue, c'est d'abord (et surtout) la croissance qui est affectée (Boschma et al. 2003). Les produits de la photosynthèse sont moins mobilisés vers d'autres parties de la plante et tendent à s'accumuler dans les limbes et les gaines foliaires. A l'analyse, le fourrage présente en conséquence une augmentation sensible des teneurs en hydrates de carbone solubles, parfois aussi une diminution significative des teneurs en azote (Deléglise et al., 2015). L'alimentation en phosphore est également affectée, avec des concentrations en P systématiquement plus faibles chez les plantes en situation de stress hydrique (Meisser et al., 2013).

L'aptitude des légumineuses à fixer l'azote de l'air mérite une attention particulière dans le contexte de la sécheresse. On sait que les légumineuses sont moins performantes que les graminées dans l'acquisition de l'azote du sol, cette concurrence pour N étant d'autant plus grande que la disponibilité en cet élément est réduite. En situation de forte concurrence, les légumineuses parviennent à couvrir leurs besoins en augmentant la part d'azote atmosphérique. Les mélanges de graminées et trèfles livrent des rendements N plus élevés que les couverts composés exclusivement de légumineuses, du fait de la stimulation mutuelle que les deux groupes fonctionnels exercent pour l'acquisition d'azote (Nyfeler et al. 2011). Il a également été montré que la fixation symbiotique restait efficiente en conditions de sécheresse (Hoekstra et al., 2016; Hofer et al., 2017).

La réduction de la biodisponibilité du phosphore peut entraîner une diminution de la proportion de trèfle dans la composition botanique. En effet, les légumineuses sont plus sensibles que les graminées à des conditions d'alimentation en phosphore limitantes.

Implications à l'échelle de l'exploitation

Le climat en 2050 aura des implications sur l'élevage. Les troupeaux souffriront plus fortement de la chaleur. Le risque de stress thermique, défini par un indice combinant température et humidité, a déjà fortement augmenté au cours de ces 30 dernières années (Fuhrer et Calanca, 2012). Les projections pour 2060 montrent que ce risque va encore considérablement augmenter, notamment dans les régions les plus chaudes.

Au printemps, les travaux de récolte pourraient devenir plus délicats, du fait de conditions climatiques

plus variables (longues périodes de temps sec ou au contraire très humide). Dans ce contexte, la constitution des stocks (ensilage et foin) pourrait s'avérer difficile certaines années, avec des défis liés à l'organisation des chantiers de récolte et à la qualité bactériologique des fourrages conservés. La chaleur et la sécheresse favorisent de nombreuses plantes indésirables, à l'image du *Rumex obtusifolius*, qui reste très compétitif en situation de stress hydrique. Gilgen et al. (2010) ont observé que les paramètres physiologiques (potentiel hydrique, conductance stomatique et assimilation du carbone) des plantes de rumex soumises au stress ne variaient pratiquement pas, comparativement aux plantes du traitement témoin. Cette espèce se distingue aussi par sa forte capacité/efficacité à prélever l'azote en situation de stress hydrique. Le réchauffement fera également progresser les espèces apparentées aux millets (*Setaria sp.*, *Digitaria sp.*, *Echinochloa sp.*). Ces plantes au métabolisme C4 prolifèrent spécialement bien sous les climats chauds. Le chardon (*Cirsium arvense*) gagnera aussi du terrain, particulièrement en montagne. Au-delà des rapports de concurrence décrits ci-dessus, il faut garder à l'esprit que les périodes de canicule et de sécheresse favorisent l'apparition de zones de sol nu qui sont le plus souvent colonisées par des espèces de faible valeur fourragère. Dans le même registre, le réchauffement favorisera le développement des ravageurs et des maladies. Si les cultures annuelles seront *a priori* plus touchées, on ne peut exclure ce type de risque pour les cultures herbagères.

Le CC apporte cependant aussi des avantages, à commencer par l'augmentation des rendements et l'allongement de la période de végétation. Aujourd'hui déjà, le démarrage de la végétation est de plus en plus précoce. Au cours de ces 20 dernières années, le développement phénologique des espèces fourragères en plaine s'est avancé en moyenne de quatre à six jours (Vuffray et al., 2016). L'automne dure aussi plus longtemps, offrant des conditions de pâture souvent favorables. Il s'agit donc de valoriser au mieux les opportunités en début et fin de saison; elles permettent de compenser partiellement les périodes plus défavorables en été. Dans les Alpes, les effets du CC sur la période de végétation seront encore plus marqués. Sa durée passera de 126 jours aujourd'hui à environ 170 jours en 2060, ce pour l'intervalle d'altitude compris entre 1'500 et 2'500 m (scénario A1B; MétéoSuisse, 2013). Comparativement aux régions de plaine, les zones de montagne devraient moins souffrir des périodes de sécheresse estivale. L'augmentation des aléas climatiques (par exemple les épisodes de fortes pluies) pourrait cependant nuire à l'activité pastorale. Au final, le changement climatique pourrait redonner de l'importance aux alpages, dans le sens d'une complémentarité entre la plaine et la montagne. Les estives contribueraient (d'autant plus) à sécuriser la base fourragère. Cette hypothèse est cependant liée au maintien de politiques publiques fortes en faveur de l'agriculture.

Pistes d'adaptation

Les pistes d'adaptation peuvent être regroupées en trois grands groupes de mesures: (i) la diversification de la production de fourrage, (ii) l'optimisation de la gestion des prairies et (iii) l'ajustement des systèmes de production animale.

1. Diversification de la production de fourrage

A l'avenir, les herbages devraient garder une place prépondérante dans les systèmes d'élevage en Suisse. Les prairies temporaires représentent près de 125'000 ha, soit environ 30% du total des surfaces herbagères en SAU. Il existe plusieurs mélanges standard (Mst) qui sont adaptés aux conditions sèches. Les principales formules actuellement utilisées sont celles contenant des légumineuses (notamment les mélanges de trois ans à base de luzerne ou de trèfle violet), de la fétuque élevée ou encore du dactyle. La dernière révision des mélanges standard (Suter et al., 2017) introduit deux nouvelles formules, l'une avec de l'esparcette pour la fauche et l'autre avec des variétés de trèfle violet spécialement adaptées pour la pâture.

Les cultures annuelles offrent aussi quelques possibilités intéressantes. Le maïs plante entière (utilisé en vert ou comme ensilage) reste un pilier pour de nombreuses exploitations, en raison notamment de la relative constance de sa valeur nutritive et de ses rendements. D'autres cultures suscitent cependant l'intérêt, comme le sorgho (dont il existe plusieurs types) et les mélanges de céréales immatures et de protéagineux (météils). Le sorgho permet d'obtenir des rendements comparables à ceux du maïs, avec cependant des teneurs en énergie sensiblement inférieures. Cette culture, exigeante en chaleur, pourrait trouver sa place à long terme, en cas de changement climatique important. Les méteils sont déjà très communs en France voisine, dans les régions septentrionales (département de la Drôme) qui connaissent aujourd'hui le climat qui pourrait être celui de la Suisse occidentale en 2050.

Enfin, il convient de mentionner encore les cultures dérobées, qui gagnent en importance du fait de l'allongement de la durée de végétation. Les deux principaux mélanges actuellement utilisés sont le Mst 101 (avoine–pois–poisette) et le Mst 106 (trèfle d'Alexandrie et ray-grass d'Italie). A l'avenir, des espèces comme le moha, l'avoie rude ou encore le sorgho pourraient être cultivées en association avec du trèfle d'Alexandrie (Mosimann et al., 2017).

2. Optimisation de la gestion des prairies, utilisation des ressources

Avec le CC, la gestion des prairies deviendra plus complexe, en raison des aléas climatiques mais aussi de la plus grande diversité des types de mélanges en place. Les bonnes pratiques agricoles

restent plus que jamais d'actualité: pâturer tôt au printemps, éviter d'épuiser l'herbe en situation de sécheresse (surpâture, hauteur de coupe trop basse), raisonner la fertilisation (l'azote n'a pas d'efficacité en situation de sécheresse), lutter régulièrement contre les campagnols, etc.

Les modèles de croissance (e.g. Jouven et al., 2006; Calanca et al., 2016) et les « indicateurs » agro-climatiques (<http://www.modextreme.org/webxtreme/>) ont connu ces dernières années un regain d'intérêt. Les premiers permettent de simuler la croissance de l'herbe à partir de différents paramètres climatiques. En ce sens, ils pourraient constituer un outil d'aide à la décision pour la gestion de la pâture, notamment en début de saison. En effet, au printemps, l'équilibre entre l'offre en herbe et sa consommation par les animaux est difficile à ajuster. Ces modèles sont en outre utiles pour simuler la réponse des prairies à des conditions particulières (températures très élevées, périodes de sécheresse). Les indicateurs agro-climatiques permettent de comparer les années entre elles et de décrire l'évolution des conditions de croissance.

L'adaptation du chargement des pâturages est une des clés pour pallier les périodes de sécheresse. Cette adaptation se fait en réservant suffisamment de parcelles pour la constitution de stocks. En année normale, les parcelles pour la constitution de stocks ne sont pas pâturées mais fauchées et permettent de constituer des réserves. En année sèche, les surfaces pâturées peuvent être largement étendues et l'agriculteur peut aussi utiliser les reports de stocks des années précédentes. Cette logique de prévoyance conduit cependant à utiliser les surfaces de manière prudente (chargement n'excédant pas le potentiel de production moyen sur plusieurs années). Les systèmes les plus vulnérables sont sans conteste ceux qui reposent uniquement sur l'herbe, et dont le chargement est élevé (= qui tendent à dépasser le potentiel de production moyen). Les exploitations disposant de maïs sont moins sensibles aux aléas: l'affouragement en vert constitue un levier de sécurité. La mise en place de dérobées répond à la même logique (diversité et complémentarité).

Enfin, il s'agira aussi à l'avenir d'engager une réflexion sur la gestion commune des ressources: l'utilisation de l'eau pourrait être repensée. Ces dernières années, plusieurs projets ont été soutenus par l'OFEV (« Programme pilote adaptation aux changements climatiques »); ils visent à faire face aux possibles pénuries et à limiter les situations de concurrence entre utilisateurs.

3. Ajustement des systèmes de production animale

Parmi les mesures qui concernent le troupeau, il faut distinguer les ajustements ponctuels (réalisables à court terme) des changements plus en profondeur qui affectent les systèmes de production. A court terme, les animaux peuvent puiser dans leurs réserves corporelles. Ce phénomène est souvent suivi d'une forte croissance compensatrice (dans le cas de l'engraissement bovin). Dans les situations

extrêmes, l'agriculteur peut aussi se séparer d'une partie de son cheptel. La sécheresse 1976 et, dans une moindre mesure, celle de 2003 ont conduit à de nombreuses ventes forcées.

Le changement de race, dans une logique de transition vers des systèmes plus extensifs ou le changement de filière de production (abandon du lait pour la production de viande) constituent des orientations plus radicales. Pour l'instant encore, les évolutions de ce type sont plus fortement conditionnées par des réflexions économiques et/ou liées à l'organisation du travail que climatiques.

Conclusions

L'évolution du climat en Suisse a des conséquences sur l'agriculture, qui vont encore s'amplifier d'ici à 2050. L'allongement de la période de végétation est sans conteste l'un des principaux avantages du réchauffement climatique. Le risque de sécheresse fait en revanche partie des aléas qui doivent être considérés dans la gestion des élevages. Les systèmes herbagers sont en effet particulièrement sensibles au manque d'eau.

Pour s'adapter au changement climatique, diverses mesures s'appliquent à l'exploitation des prairies et des pâturages. Elles consistent, d'une part, à diversifier les espèces cultivées, en utilisant notamment des plantes résistantes aux stress hydrique et thermique. D'autre part, il s'agit de mieux tirer parti du potentiel des herbages, entre autres par l'extension du pâturage en début et en fin de saison. Enfin, dans certains cas, l'autonomie fourragère des exploitations ne pourra être établie qu'en rééquilibrant la charge en bétail. Cela impliquera une extension des surfaces fourragères (prairies temporaires encouragées dans les exploitations sans bétail, meilleure valorisation des zones d'estivage, ...) ou une diminution des besoins alimentaires du cheptel (baisse des effectifs, modification dans les objectifs d'élevage).

Pour accompagner les éleveurs dans leur démarche d'adaptation, la recherche devra proposer de nouvelles alternatives en ce qui concerne le choix des cultures fourragères et développer des outils innovants (basés notamment sur les paramètres climatiques) pour la gestion des pâturages.

Bibliographie

Académies suisses des sciences naturelles (2016): Coup de projecteur sur le climat suisse. Etat des lieux et perspectives (Académies suisses des sciences, éd.). Berne, Suisse

Ainsworth, E.A. and Long, S.P. (2005): What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. *New Phytologist* **165**: 351-372

Boschma, S.P., Scott, J.M., Hill, M.J., King, J.R. and Lutton, J.J. (2003): Plant reserves of perennial grasses subjected to drought and defoliation stresses on the Northern Tablelands of New South Wales, Australia. *Australian Journal of Agricultural Research* **54**: 819-828

- Buxton, D.R. (1996): Quality-related characteristics of forages as influenced by plant. *Anim. Feed Sci. Tech.* **59**: 37-49
- Calanca, P., Deléglise, C., Martin, R., Carrère, P. et Mosimann, E. (2016): Testing the ability of a simple grassland model to simulate the seasonal effects of drought on herbage growth. *Field Crops Research* **187**: 12-23
- CH2011 (2011): Swiss Climate Change Scenarios CH2011. Published by C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate and OcCC. Zurich, Switzerland
- Deléglise, C., Meisser, M., Mosimann, E., Spiegelberger, T., Signarbieux, C., Jeangros, B. and Buttler, A. (2015): Drought-induced shifts in plants traits, yields and nutritive value under realistic grazing and mowing managements in a mountain grassland. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **213**: 94-104
- Dumont, B., Andueza, D., Niderkorn, V., Lüscher, A., Porqueddu, C. and Picon-Cochard C. (2015): A meta-analysis of climate change effects on forage quality in grasslands: specificities of mountain and Mediterranean areas. *Grass and Forage Science.* **70**: 239-254
- Fischer, E.M. and Knutti, R. (2015): Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes. *Nature Climate Change* **5**: 560-564
- Fuhrer, J. and Calanca, P. (2012): Le changement climatique influence le bien-être des vaches laitières. *Recherche Agronomique Suisse* **3**: 132-139
- Gilgen, A.K., Signarbieux, C., Feller, U. and Buchmann, N. (2010): Competitive advantage of *Rumex obtusifolius* L. might increase in intensively managed temperate grasslands under drier climate. *Agric. Ecosyst. Environ.* **135**: 15-23
- Grant, K., Kreyling, J., Dienstbach, L.F.H., Beierkuhnlein, C. and Jentsch, A. (2014): Water stress due to increased intra-annual precipitation variability reduced forage yield but raised forage quality of a temperate grassland. *Agric. Ecosyst. Environ.* **186**: 11-22
- Grime, J.P., Brown, V.K., Thompson, K., Masters, G.J., Hillier, S.H., Clarke, I.P., Askew, A.P., Corker, D. and Kielty, J.P. (2000): The response of two contrasting limestone grasslands to simulated climate change. *Science* **289**: 762-5
- Hebeisen, T., Lüscher, A., Zanetti, S., Fischer, B., Hartwig, U., Frehner, M., Hendrey, G., Blum, H. and Nösberger, J. (1997): Growth response of *Trifolium repens* L. and *Lolium perenne* L. as monocultures and bi-species mixture to free air CO₂ enrichment and management. *Global Change Biology* **3**: 149-160
- Hoekstra, N.J., Finn, J.A. and Lüscher, A. (2016): The effects of legume content and drought on symbiotic N₂ fixation and herbage nitrogen yield. In: *Grassland Science in Europe, Vol. 21 – Proceedings of the 26th General Meeting of the European Grassland Federation Trondheim, Norway. 4-8 September 2016* (Höglind, M., Bakken, A.K., Hovstad, K.A., Kallioniemi, E., Riley, H., Steinshamn, H. and Østrem L., eds). Wageningen, The Netherlands
- Jouven, M., Carrère, P. and Baumont, R. (2006): Model predicting dynamics of biomass, structure and digestibility of herbage in managed permanent pastures. 1. Model description. *Grass and Forage Science.* **61**: 112-124
- Lemaire, G. and Gastal, F. (1997): N uptake and distribution in plant canopies. In: *Diagnosis on the nitrogen status in crops* (Lemaire G., ed.). Springer-Verlag, Heidelberg, Germany: 3-43
- Luo, Y., Hui, D. and Zhang, D. (2006): Elevated CO₂ stimulates net accumulations of carbon and nitrogen in terrestrial ecosystems: A meta-analysis. *Ecology* **87**: 53-63
- Lüscher, A., Hendrey, G.R. and Nösberger, J. (1998): Long-term responsiveness to free air CO₂ enrichment of functional types, species and genotypes of permanent grassland. *Oecologia* **113**: 37-45

- Lüscher, A., Daepf, M., Blum, H., Hartwig, U.A. and Nösberger, J. (2004): Fertile temperate grassland under elevated atmospheric CO₂ – role of feed-back mechanisms and availability of growth resources. *European Journal of Agronomy* **21**: 379-398
- Meisser, M., Deléglise, C., Mosimann, E., Signarbieux, C., Mills R., Schlegel P., Buttler, A. and Jeangros, B. (2013): Effets d'une sécheresse estivale sévère sur une prairie permanente de montagne du Jura. *Recherche Agronomique Suisse* **4**: 476-483
- Meisser, M., Le Danvic, M., Deléglise, C. and Mosimann, E. (2014): Effects of drought and cutting frequency on agronomic value and functional traits of two pastures of the Jura mountains. *Options Méditerranéennes* **109**: 511-515
- MétéoSuisse (2013): Scénarios climatiques Suisse – Un aperçu régional. Rapport technique n° 243 MétéoSuisse, 36 pages
- Mosimann, E., Bossuyt, N. et Frund, D. (2017): Préparation de la production fourragère au changement climatique. Rapport du projet milClim, conduit dans le cadre du programme pilote « Adaptation aux changements climatiques », soutenu par l'Office fédéral de l'agriculture
- Mosimann, E., Deléglise, C., Demenga, M., Frund, D., Sinaj, S. and Charles, R. (2013): Disponibilité en eau et production fourragère en zone de grandes cultures. *Recherche Agronomique Suisse* **4**: 468-475
- Mosimann, E., Meisser, M., Deléglise, C. and Jeangros, B. (2012): Potentiel fourrager des pâturages du Jura. *Recherche Agronomique Suisse* **3**: 516-523
- Newman, J.A., Abner, M.L., Dado, R.G., Gibson, D.J., Brookings, A. and Parsons, A.J. (2003): Effects of elevated CO₂, nitrogen and fungal endophyte-infection on tall fescue: growth, photosynthesis, chemical composition and digestibility. *Global Change Biology* **9**: 425-437
- Nyfelner, D., Huguenin-Elie, O., Suter, M., Frossard, E. and Lüscher, A. (2011): Grass-legume mixtures can yield more nitrogen than legume pure stands due to mutual stimulation of nitrogen uptake from symbiotic and non-symbiotic sources. *Agric. Ecosyst. Environ.* **140**: 155-163
- OcCC/ProClim (2007): Climate Change and Switzerland 2050. Expected Impacts on Environment, Society and Economy. (OcCC/ProClim eds.). Bern, Switzerland
- Poorter, H. (1998): Do slow-growing species and nutrient-stressed plants respond relatively strongly to elevated CO₂? *Global Change Biology* **4**: 693-697
- Soussana, J.F. and Lüscher, A. (2007): Temperate grasslands and global atmospheric change: a review. *Grass and Forage Science* **62**: 127-134
- Stampfli, A. and Zeiter, M. (2004): Plant regeneration directs changes in grassland composition after extreme drought: a 13-year study in southern Switzerland. *J. Ecol.* **92**: 568-576
- Suter, D., Rosenberg, E., Mosimann, E. et Frick, R. (2017): Mélanges standard pour la production fourragère: Révision 2017–2020. *Recherche Agronomique Suisse* **8**: 1-16
- Violle, C., Navas, M.L., Vile, D., Kazakou, E., Fortunel, C., Hummel, I. and Garnier, E. (2007): Let the concept of trait be functional! *Oikos* **116**: 882-892
- Vuffray, Z., Deléglise, C., Amaudruz, M., Jeangros, B., Mosimann, E. et Meisser, M. (2016): Développement phénologique des prairies de fauche – 21 ans d'observations. *Recherche Agronomique Suisse* **7**: 322-329
- Zanetti, S., Hartwig, U.A., van Kessel, C., Lüscher, A., Hebeisen, T., Frehner, M., Fischer, B.U., Hendrey, G.R., Blum, H. and Nösberger, J. (1997): Does nitrogen nutrition restrict the CO₂ response of fertile grassland lacking legumes? *Oecologia* **112**: 17-25.

Klimawandel und Nutztiere: eine wechselseitige Beeinflussung

*Dr. Carla Riccarda Soliva
gewidmet*

Tagungsbericht

18. Mai 2017

Herausgeber:

M. Kreuzer, T. Lanzini, A. Liesegang, R. Bruckmaier, H.D. Hess, S.E. Ulbrich

ETH-Schriftenreihe zur Tierernährung

Band 40
ETH-Schriftenreihe zur Tierernährung

ISBN 978-3-906466-40-X

Adresse: ETH Zürich
Institut für Agrarwissenschaften
Tierernährung / LFW
Universitätstrasse 2
8092 Zürich

Mai 2017