

Evènements de sécheresse: caractérisation et effets sur les services agronomiques des prairies

Marco Meisser, Claire Deléglise, Luc Stévenin et Eric Mosimann

Agroscope, Institut des sciences en production animale IPA, 1260 Nyon, Suisse

Renseignements: Marco Meisser, e-mail: marco.meisser@agroscope.admin.ch



Simulations de différents régimes pluviométriques sous tunnels maraîchers.

Introduction

Les systèmes herbagers sont sensibles au déficit hydrique (Lemaire et Pflimlin 2007). En Suisse romande, la sécheresse estivale entraîne une baisse de rendement pouvant atteindre 40 % en année extrême (Mosimann *et al.* 2012). Dans les essais où l'on simule le stress hydrique, l'écart annuel varie de 10 % à 50 % (Gilgen et Buchmann 2009; Meisser *et al.* 2013).

La sécheresse influence aussi la valeur nutritive du fourrage, mais moins que le rendement (Buxton et Casler 1993; Buxton et Fales 1994). Les études concernant les effets de la sécheresse montrent des résultats contradictoires. Jensen *et al.* (2010) indiquent qu'une sécheresse modérée entraîne une augmentation des teneurs en matière azotée (MA) et une diminution des concentrations en constituants pariétaux, en raison entre autres d'une maturation plus lente des plantes (Halim *et al.* 1989). D'autres auteurs observent au

contraire qu'un stress sévère cause une baisse des teneurs en MA due à la sénescence des feuilles (Buxton 1996) ou à la diminution de l'aptitude des légumineuses à fixer l'azote atmosphérique, cette diminution étant plus importante que la réduction de la croissance (Küchenmeister *et al.* 2013).

Le stress hydrique peut aussi influencer indirectement la valeur nutritive, au travers des modifications de la composition botanique. Pour Grant *et al.* (2014), les changements de composition botanique et la sénescence seraient les deux principaux facteurs influençant la valeur nutritive lors de sécheresses. Alors que l'abondance des espèces peut fluctuer assez fortement au cours d'une période de végétation, leur remplacement (*turnover*) est généralement beaucoup plus lent.

En l'absence de critères objectifs pour caractériser le niveau de stress «ressenti» par les plantes, il est difficile de comparer les essais de sécheresse. Vicca *et al.* (2012) insistent sur la nécessité de définir des indices communs pour quantifier le niveau de stress. Les réponses au manque d'eau dépendent surtout de la quantité et de la répartition des pluies. La nature du sol (profondeur, classe texturale) et les caractéristiques de la végétation (composition botanique, caractéristiques fonctionnelles des plantes) sont d'autres facteurs importants. Enfin, les paramètres climatiques (rayonnement, vent, température) influencent l'évapotranspiration et, par conséquent, l'état hydrique du sol. Pour mieux interpréter les essais et la réponse des écosystèmes prairiaux, il faudrait caractériser le stress ressenti par les plantes. Mais rares sont les études qui mesurent en continu la teneur volumétrique ou la tension de l'eau dans les différents horizons du sol. Ce suivi est pourtant essentiel pour caractériser les réserves en eau et leur accessibilité pour les plantes (Vicca *et al.* 2012).

Cet article évalue l'intérêt de différents indices pour quantifier la sévérité des évènements de sécheresse. Les écarts de rendement observés dans les essais de sécheresse sont présentés et discutés à la lumière de ces indices. Les changements de valeur nutritive et de composition botanique observés à très court terme, c'est-à-dire au moment du stress hydrique, sont également abordés.

Matériel et méthodes

Sites d'essai et traitements de sécheresse

Le tableau 1 présente les principales caractéristiques des sites d'essais. Les résultats de cet article proviennent uniquement de prairies permanentes et temporaires intensives, c'est-à-dire fauchées ou pâturées toutes les 4 à 5 semaines.

Le stress hydrique a été simulé à l'aide de tunnels maraîchers. En 2012 et en 2013, les traitements de sécheresse (placettes sous tunnels maraîchers) n'ont pas reçu d'eau pendant toute la durée du stress et ont été comparés à des placettes témoin à l'air libre (précipitations naturelles; tabl. 1). En 2014, à Coinsins et à Bière, différents régimes de pluie ont été simulés sous les tunnels à l'aide d'une rampe d'arrosage équipée d'un débitmètre. Les traitements étaient les suivants: 100 % (traitement de référence), 66 % et 33 % de la norme pluviométrique (tabl. 1). La fréquence des arrosages a été réduite dans des proportions semblables: 8 à 10 jours de pluie par mois pour le traitement 100 %, 6 et 3 jours pour les traitements 66 % et 33 % respectivement. Par rapport aux traitements sans arrosage, la simulation de régimes hydriques présente deux avantages: les situations sont beaucoup plus représentatives d'un évènement de sécheresse réel et les conditions de température et de rayonnement actif pour la photosynthèse (PAR) sont les mêmes pour tous les traitements (Vogel *et al.* 2012).

Les périodes considérées dans cette étude se rapportent à des cycles de croissance et ne coïncident pas toujours avec les dates de début et de fin des simulations de sécheresse. Par exemple, la période considérée en 2012 couvre les cycles de croissance 2 à 4 (96 jours; tabl. 1). Le traitement de sécheresse n'a cependant débuté qu'au cours du deuxième cycle pour se terminer à la fin du quatrième (76 jours). En 2013, à Chéserex, la période de sécheresse était aussi un peu plus courte que les deux cycles de croissance (47 jours contre 58 jours).

Données météorologiques

Un pluviomètre et des sondes pour mesurer la température de l'air (30 cm et 2 m) et du sol (-12 cm) ont été installés dans tous les lieux d'essai. La teneur volumétrique en eau du sol a été mesurée en continu à La Frêtaz (sondes Decagon EC-5; data loggers EM-50). En 2013 et 2014, le potentiel hydrique du sol a été suivi en continu à l'aide de tensiomètres (bougies Watermark; data loggers Irrrometer).

Les autres paramètres météorologiques nécessaires au calcul de l'évapotranspiration (rayonnement solaire, hygrométrie, vitesse du vent) proviennent de stations

■ **Résumé** La comparaison des évènements de sécheresse (simulés ou naturels) nécessite des critères communs qui reflètent le stress «ressenti» par les plantes. Cette étude évalue la pertinence de différents indices pour caractériser la sévérité des périodes de déficit hydrique. Les réflexions autour des indices s'appuient sur les résultats des essais de sécheresse (simulations sous tunnels maraîchers) conduits par Agroscope entre 2012 et 2014 sur des prairies intensives situées entre 470 et 1200 m d'altitude.

Les indices basés sur les seuls paramètres climatiques ne sont pas adéquats pour décrire l'intensité d'un traitement de sécheresse. Le déficit théorique ($P - ETP$), par exemple, ne permet pas de caractériser l'intensité du stress «ressenti» par les plantes, car il ne considère pas les relations entre la végétation et le sol. Les indices basés sur l'eau disponible dans le sol sont plus pertinents et permettent de mieux expliquer les écarts de rendement entre les placettes exposées à une sécheresse et celles correctement approvisionnées en eau. Dans nos essais, les écarts de rendement ont varié de 13 % à 60 % suivant les situations. Les effets de la sécheresse sur la valeur nutritive sont plus difficiles à cerner que les effets sur le rendement. Les indices précités ne permettent pas d'expliquer les variations de valeur nutritive observées. En effet, le stress hydrique affecte la végétation ou son environnement à travers différents processus qui agissent parfois de façon antagoniste sur la qualité du fourrage. Cependant, en l'absence de changement important de la composition botanique, la sécheresse a bien moins d'impact sur la qualité du fourrage que sur le rendement.

du réseau de MétéoSuisse (sites de La Frêtaz, Chéserex et Coinsins) et d'une station mobile Campbell installée par nos soins (site de Bière).

Caractérisation de l'intensité de la sécheresse

Trois approches ont été comparées pour évaluer l'intensité d'une sécheresse. La première ne repose que sur des paramètres climatiques. La deuxième fait intervenir, en plus, les conditions du sol (calcul du bilan hydrique). La troisième combine des paramètres relatifs au climat, au sol et à la végétation. >

Tableau 1 | Caractéristiques des sites étudiés et données relatives aux simulations de sécheresse

Site (Coord. CN)	Année	Alt. (m)	Végétation	Procédés ¹	n ²	Dates	Durée (j)	Utilisat. ³	Préc. (mm) ³	Temp. (°C) ⁴
Frétaz 533'435 / 181'780	2012	1200	PP	témoin	4	25.05 – 30.08	96	3	355	14,3
			*	stress			96	3	109	
Chésereux 501'930 / 139'550	2013	540	PP	témoin	3	20.06 – 16.08	58	2	257	19,0
			**	stress			58	2	73	
Coinsins 507'160 / 141'630	2014	460	PT	100 %	3	23.04 – 30.07	99	3	248	15,8
			***	66 %			99	3	162	
				33 %			99	3	82	
Bière 517'115 / 145'500	2014	700	PT	100 %	3	06.05 – 07.08	94	3	311	15,6
			****	66 %			94	3	209	
				33 %			94	3	116	

* Principales espèces: pâturin des prés, pâturin commun, agrostide capillaire, ray-grass anglais, fétuque des prés, dactyle, trèfle blanc.

** Principales espèces: ray-grass anglais, phléole des prés, fétuque des prés, pâturin des prés et trèfle blanc.

*** Principales espèces: ray-grass anglais, dactyle, trèfle violet, trèfle blanc et luzerne.

**** Principales espèces: ray-grass anglais, dactyle et trèfle blanc.

¹Témoin: précipitations naturelles (eaux de pluie); stress: absence totale d'eau pendant la couverture; 100 %, 66 % et 33 %: apports d'eau par rapport à la norme pluviométrique;

²Nombre de répétitions; ³Nombre d'utilisations et précipitations pendant l'évènement de stress; ⁴Température journalière moyenne.

1. Dans la pratique, on calcule souvent le déficit théorique, qui correspond à la différence entre les précipitations effectives et l'évapotranspiration potentielle (P–ETP). L'évapotranspiration de référence (ET_o, ci-après ETP) peut être estimée avec différentes formules. Celle de Penman-Monteith (Allen *et al.* 1998) est recommandée par la FAO et bien adaptée pour calculer l'ETP des prairies sur le Plateau suisse (Calanca *et al.* 2011).

2. La seconde approche se base sur la relation assez étroite entre le rendement d'une culture et l'eau que cette dernière transpire. La baisse relative de rendement est directement proportionnelle à la réduction relative de l'évapotranspiration (Doorenbos et Kassam 1979). Lors du calcul de l'évapotranspiration, un facteur de correction (K_c) a été utilisé pour tenir compte de la baisse de l'évapotranspiration quand l'eau devient moins accessible pour les plantes. L'introduction de ce facteur dépend de l'état des réserves en eau du sol et passe par l'établissement d'un bilan hydrique simplifié, ce qui nécessite de connaître la nature et la profondeur du sol. Dans les situations présentées ci-après, le calcul de l'humidité dans le sol a été ajusté aux mesures de tension et d'humidité volumétrique réalisées sur le terrain.

3. La troisième approche se base également sur l'évolution des réserves en eau du sol, mais elle tient compte de la nature de la végétation. Elle repose sur le rapport entre la quantité d'eau accessible (R) et la réserve en eau utile (RU), où R représente la quantité d'eau accessible pour les plantes le jour *t* et RU la quantité d'eau qui peut être utilisée par les plantes quand le sol passe de la capacité au champ au point de flétrissement. La RU est estimée à partir de la classe texturale et de la profondeur du sol.

Le rapport R/RU, qui varie de 0 à 1, représente donc la proportion d'eau disponible le jour *t*. On considère généralement que 50 à 65 % de la RU est facilement accessible aux végétaux. Lorsque le ratio R/RU est en-deçà d'un certain seuil (par exemple 0,5), la culture a épuisé la réserve d'eau facilement accessible et entre en état de stress. La sommation des jours où R/RU < Seuil_{stress} donne une indication quant à la durée du stress. Dans le même ordre d'idée, on peut calculer l'intensité d'un stress hydrique selon la formule suivante de Granier *et al.* (2007):

$$\text{Intensité stress}_{BH} = \sum (\text{maximum } [0, (\text{Seuil} - R/RU) / \text{Seuil}])$$

Les seuils utilisés dans cette étude sont de 0,50 pour les couverts à base de graminées et de trèfle blanc et de 0,40 pour les couverts riches en luzerne et en trèfle violet.

Mesures de rendement

Lors de chaque récolte, le fourrage a été pesé puis mélangé et deux échantillons ont été prélevés: le premier pour déterminer la teneur en matière sèche (MS) et le second pour l'analyse chimique. Les rendements en biomasse ont été calculés en cumulant la biomasse récoltée pendant la période considérée (tabl. 1). L'écart de rendement est la variation du traitement de sécheresse par rapport au témoin:

$$\text{Ecart de rendement} = [1 - (\text{Rdt}_{\text{séch.}} / \text{Rdt}_{\text{témoin}})]$$

Relevés botaniques

Les relevés botaniques ont été effectués à l'aide de la méthode des points quadrats. Les résultats présentés proviennent d'observations réalisées à la fin de l'épisode de

Tableau 2 | Paramètres et index considérés pour évaluer les effets de la sécheresse

Site	Année	Procédés	Prof. sol ¹ (mm)	P – ETP ²	1 - (ET _a / ET _p) ³	Durée stress _{BH} (j)	Intensité stress _{BH}
Frétaz	2012	témoin	500	27	0,01	0	0
		stress		-219	0,45	57	39
Chésereux	2013	témoin	800	-15	0,03	0	0
		stress		-199	0,45	29	11
Coinsins	2014	100	400	-44	0,06	0	0
		66		-130	0,28	15	2
		33		-210	0,49	57	19
Bière	2014	100	700 - 800	-8	0,02	0	0
		66		-110	0,22	40	4
		33		-203	0,39	64	16

¹Profondeur moyenne du sol. ²P: précipitations, ETP: évapotranspiration. ³ET_a/ET_p: baisse relative de l'évapotranspiration (cf. Matériel et méthodes).

sécheresse. En 2012, les relevés ont été réalisés en deux zones de chaque placette à l'aide d'une grille de maillage (100 points au total). Dès 2013, les analyses botaniques ont été faites le long de deux transects (40 points par placette de 4 m²). Les contributions spécifiques (Daget et Poissonet 1971) ont été calculées pour chaque placette.

Analyses chimiques

Les teneurs en matière azotée (MA), en constituants pariétaux (NDF et ADF) et en sucres ont été estimées à l'aide du NIRS. Les teneurs en minéraux (P et K) ont été déterminées après calcination (550 °C) par spectrométrie d'émission optique (ICP-EOS). Les teneurs en nutriments sur l'ensemble de la période considérée (deux ou trois utilisations selon les sites) ont été obtenues en pondérant les teneurs de chaque récolte par son rendement.

Tableau 3 | Rendement pendant la période de stress et teneurs en nutriments: matière azotée (MA), constituants pariétaux (ADF et NDF), sucres solubles, phosphore (P) et potassium (K)

Site	Procédés	Rdt (t/ha)	MA ¹ (g/kg MS)	ADF ¹ (g/kg MS)	NDF ¹ (g/kg MS)	Sucres ¹ (g/kg MS)	P ¹ (g/kg MS)	K ¹ (g/kg MS)
Frétaz	témoin	4,80	198	255	446	93	4,3	34,7
	stress	1,94	196	236	419	115	3,4	30,1
	<i>ppds</i>	1,00	<i>ns</i>	15,8	<i>ns</i>	15,9	0,35	1,90
Chésereux	témoin	2,41	197	240	401	–	–	–
	stress	1,43	192	248	407	–	–	–
	<i>ppds</i>	0,75	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	–	–	–
Coinsins	100	4,72	194	274	367	120	–	–
	66	4,11	194	271	362	121	–	–
	33	2,92	182	265	358	125	–	–
	<i>ppds</i>	1,22	9,7	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	–	–
Bière	100	5,77	204	237	341	121	–	–
	66	3,80	206	228	332	125	–	–
	33	2,50	208	220	325	138	–	–
	<i>ppds</i>	0,52	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	12,2	–	–

¹Valeurs obtenues en pondérant les teneurs des différentes récoltes par les rendements.

Les valeurs en gras sont significativement différentes (pour P < 0,05); *ns*: 0,1 > P > 0,05; *ns*: non significatif; '–' pas de valeur.

Analyses statistiques

La mise en valeur statistique des rendements, des teneurs en nutriments et des contributions des espèces a été effectuée à l'aide d'analyses de variance (ANOVA) à un facteur (régime hydrique). Le test de la plus petite différence significative (LSD) de Fisher a été utilisé pour comparer les moyennes entre elles.

Résultats et discussion

Caractérisation de l'intensité de la sécheresse

Les indices obtenus pour caractériser l'intensité de la sécheresse figurent dans le tableau 2. Les rendements obtenus sur les différents sites et pour les différents traitements sont indiqués dans le tableau 3. L'écart relatif entre le(s) traitement(s) de sécheresse et le témoin varie >

Tableau 4 | Evolution de la composition botanique des principaux groupes d'espèces au terme de la période de sécheresse

Site	Procédés	Litière (%)	Graminées ¹ (%)	Légumineuses ¹ (%)	Autres pl. ¹ (%)
Frêtaz	témoin	2,3	66,7	19,3	14,0
	stress	37,7	69,8	12,6	17,6
	<i>ppds</i>	5,4	<i>ns</i>	<i>ms</i>	<i>ns</i>
Chésereux	témoin	0,7	63,8	4,9	31,3
	stress	38,9	74,2	3,7	22,1
	<i>ppds</i>	9,2	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>
Coinsins	100	0,0	31,6	68,0	0,4
	66	0,0	30,4	69,7	0,0
	33	2,8	32,0	68,0	0,0
	<i>ppds</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>
Bière	100	0,0	55,3	44,4	0,3
	66	0,0	56,4	43,6	0,0
	33	40,6	71,6	27,7	0,7
	<i>ppds</i>	3,2	12,0	11,3	<i>ns</i>

¹Pour établir les proportions des trois groupes, la litière n'a pas été considérée (uniquement parties vertes).
Les valeurs en gras sont significativement différentes (pour $P < 0,05$); *ms*: $0,1 > P > 0,05$; *ns*: non significatif.

de 13 % à 60 %. Les baisses les plus importantes ont été observées à la Frêtaz et à Bière (traitement 33 %), et la plus faible à Coinsins (66 %).

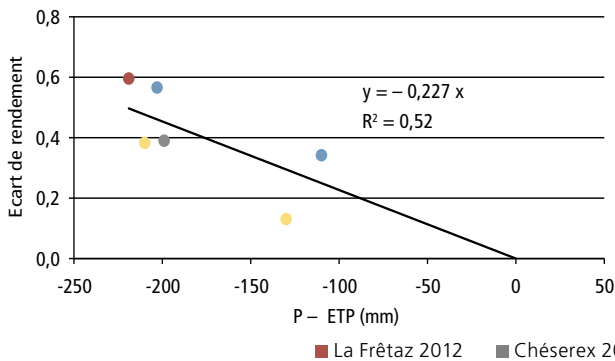
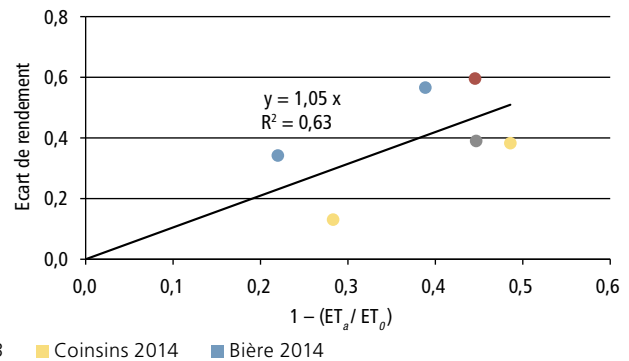
Les figures 1 à 3 présentent les relations entre les indices de stress et les écarts relatifs de rendement. Les critères $P - ETP$ et $[1 - (ET_a / ET_0)]$ donnent globalement la même image (fig. 1 et 2), même si le classement des situations selon le niveau de stress n'est pas tout à fait le même. Les figures 1 et 2 ne permettent pas de séparer Chésereux de Coinsins 33 %: les deux sites présentent le même niveau de stress et la même réponse, ce qui donne à penser que les deux végétations se comportent de la même façon. Alors que les réponses de Coinsins sont clairement en-dessous de la droite de régression, celles de Bière se situent au-dessus. Ces différences sont à relier à la nature des couverts: la prairie de Coinsins (composée essentiellement de luzerne et de trèfle violet) est plus résistante à la sécheresse que celle de Bière (dominée par le ray-grass anglais et le trèfle blanc). La relation présentée à la figure 3.1 est plus étroite que les deux précédentes ($R^2 = 0,71$), du fait de la prise en compte (même grossière) de la sensibilité de la végétation à la sécheresse. Le site de Chésereux se distingue clairement de celui de Coinsins 33% (même écart de rendement mais différence dans le niveau de stress) et apparaît comme plus sensible à la sécheresse, ce qui n'était pas le cas avec les deux indices précédents, trop approximatifs pour refléter l'intensité du traitement. Avec un R^2 de 0,81, l'indice basé sur l'intensité du stress (fig. 3.2) semble le plus pertinent des quatre. On peut cependant s'interroger sur la forme logarith-

mique de la relation: l'écart de rendement varie de moins en moins à mesure qu'augmente l'intensité du stress. Sur la base de cet indice, La Frêtaz se distingue très clairement des autres situations par l'intensité du stress. Suivent par intensité décroissante: Coinsins 33 % et Bière 33 %, puis Chésereux, Bière 66 % et enfin Coinsins 66 %.

Effets de la sécheresse sur la valeur nutritive

Les tableaux 3 et 4 présentent l'évolution des teneurs en nutriments et de la composition botanique. Ces paramètres ne peuvent pas être analysés à l'aide des indices de stress présentés ci-dessus, car les effets de la sécheresse sur la valeur nutritive sont souvent antagonistes et doivent être interprétés au cas par cas.

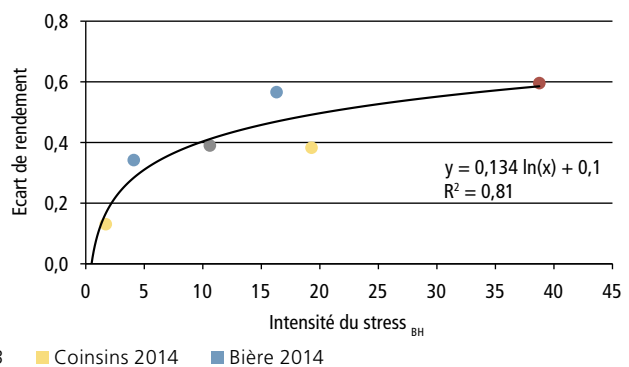
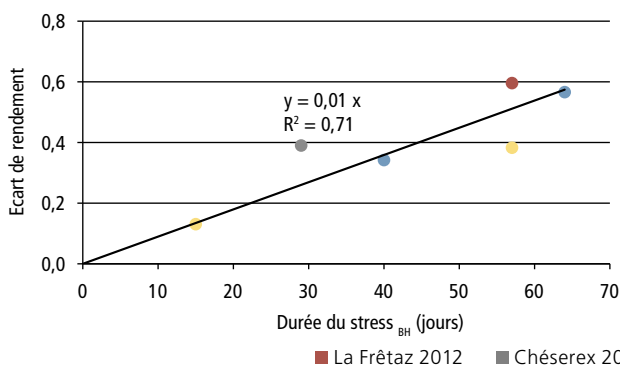
A La Frêtaz, le recul du trèfle blanc était marginalement significatif ($0,10 > P > 0,05$) et la sénescence a affecté près de 40 % du couvert. Sur le plan de la valeur nutritive, les teneurs en lignocellulose (ADF) étaient significativement plus faibles dans le traitement de sécheresse, ce qui s'explique probablement par l'augmentation des teneurs en sucres solubles. Cette augmentation provoque une diminution passive des concentrations des autres nutriments, en particulier des constituants pariétaux (ADF et NDF). Lorsqu'elle est sévère, la sécheresse peut causer une diminution de la valeur nutritive, notamment au travers de la sénescence précoce des plantes (ou de ses parties les plus riches comme les feuilles), entraînant la réallocation des sucres et de la MA dans les parties basales des plantes (Buxton 1996). Sur l'ensemble de la période considérée à La Frêtaz


Figure 1 | Déficit théorique.

Figure 2 | Relation entre baisse relative de l'évapotranspiration et baisse relative du rendement.

(cycles 2 à 4; 96 jours), nous n'avons pas observé de diminution de la valeur nutritive. Les teneurs en MA de la quatrième utilisation étaient toutefois significativement plus basses dans le traitement de sécheresse que dans le témoin (données non montrées, $P < 0,001$). Cet écart en toute fin de période n'apparaît pas dans le tableau 3, qui présente les teneurs en nutriments pondérées par le rendement.

A Chésérèx, aucune modification de la composition botanique n'a été constatée et les teneurs en nutriments n'ont pas été influencées par le traitement de sécheresse. Les seuls effets observés concernent la formation de litière. A Coinsins, la composition botanique est restée stable avec une faible formation de litière. En raison de la forte abondance des légumineuses (près de 70 %), la sécheresse sévère du traitement 33 % pourrait avoir impacté la fixation de l'azote atmosphérique, ce qui s'est traduit par une baisse significative des teneurs en MA. Küchenmeister *et al.* (2013) rapportent que le stress hydrique réduit plus fortement la fixation de l'azote atmosphérique que la croissance des légumineuses.

A Bière, dans le traitement le plus sec (33 %), le trèfle blanc a reculé au profit des graminées. La formation de litière était importante (environ 40 %) et les teneurs en sucres plus élevées que dans les deux autres traitements. L'intensité croissante du stress (de 100 % à 33 %) a entraîné, en tendance, une augmentation des teneurs en MA et une baisse de celles en ADF. Les prairies bien approvisionnées en eau présentent souvent une valeur nutritive un peu plus basse que les prairies en situation de déficit hydrique (Mosimann *et al.* 2013; Grant *et al.* 2014). Ces différences peuvent être expliquées par l'effet «de dilution» (Lemaire et Gastal 1997). En effet, l'évolution ontogénique des plantes entraîne une diminution des concentrations N à mesure qu'augmente la formation de biomasse. Au cours de leur croissance, les plantes investissent davantage dans le matériel structural (pauvre 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, ralentit le phénomène de dilution. ➤


Figure 3.1 et 3.2 | Indicateurs basés sur le bilan hydrique faisant intervenir un seuil de stress spécifique au type de végétation.

Le seuil de stress (figures 3.1 et 3.2) a été fixé à 0,5 pour La Frêtaz, Chésérèx et Bière; à 0,4 pour Coinsins (végétation plus résistante à la sécheresse avec de la luzerne et du trèfle violet). Pour plus de détails, se reporter au chapitre «Matériel et méthodes».

Dans l'ensemble, ces résultats rejoignent ceux de Dumont *et al.* (2015): en situation de sécheresse, les teneurs en MA tendent à augmenter (5 % en moyenne dans l'étude précitée), alors que celles en parois (NDF) tendent à diminuer (3 % en moyenne).

Au niveau de la composition botanique, les principales modifications observées concernent l'abondance du trèfle blanc. Le recul de cette espèce n'a été que temporaire sur trois des quatre sites. A La Frêtaz, la plus faible abondance du trèfle blanc a cependant persisté jusqu'au début de la période de végétation suivante. En raison de sa contribution spécifique assez faible (10 à 20 % du couvert), les variations du trèfle blanc observées à La Frêtaz n'ont probablement que peu influencé la valeur nutritive du fourrage.

Conclusions et perspectives

L'intérêt d'utiliser des indices pour apprécier la sévérité des évènements de sécheresse a été vérifié. Les indices facilitent la comparaison entre les traitements et les essais et permettent de mieux appréhender l'amplitude des baisses de rendement. Les indices combinant des paramètres relatifs au climat, au sol et à la végétation semblent les plus adéquats pour analyser ces réponses. Il reste cependant une part de variation inexpliquée.

S'agissant de la valeur nutritive, il est difficile de délivrer un message clair. Le manque d'eau affecte la végé-

tation ou son environnement à travers différents processus qu'il est difficile de séparer: réponses physiologiques (par exemple baisse de la fixation d'azote atmosphérique), effets liés à l'évolution ontogénique des plantes, changements dans les proportions de nutriments (évolution passive des teneurs), modification de la composition botanique et/ou même réduction de la disponibilité des éléments nutritifs dans le sol. Pour améliorer la compréhension des réponses à la sécheresse, il est indispensable de mieux identifier l'importance de ces différents processus. Les résultats présentés ici ne sont que des réponses à très court terme à des évènements ponctuels, intenses mais de durée limitée. L'apparente stabilité de la composition botanique demande à être confirmée dans des conditions répétées de sécheresse (évènements se succédant plusieurs années de suite).

Mis à part la mise à disposition de références, l'une des principales tâches de la recherche est d'établir des indicateurs pour prévoir la réponse des communautés végétales à un stress hydrique. Pour ce faire, différentes disciplines (agronomie, écophysiologie, écologie des communautés, bioclimatologie) doivent être associées dans une démarche intégrative. C'est l'un des principaux objectifs du projet GrassAlt (<http://p3.snf.ch/Project-156282>), débuté en 2015. ■

Bibliographie

- Allen R. G., Pereira L. S., Raes D. & Smith M., 1998. FAO Irrigation and Drainage Paper n° 56. Rome, FAO.
- Buxton D. R. & Casler M. D., 1993. Environmental and genetic effects on cell wall composition and digestibility. In: Forage Cell Wall Structure and Digestibility (Ed. H. G. Jung, D. R. Buxton, R. D. Hatfield & J. Ralph). ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI.
- Buxton D. R. & Fales S. L., 1994. Plant environment and quality. In: Forage quality, evaluation and utilization (G. C. Jr. Fahay, M. Collins, D. R. Mertens & L. E. Moser). ASA, CSSA & SSSA, Lincoln, NE.
- Buxton D. R., 1996. Quality-related characteristics of forages as influenced by plant. *Anim. Feed Sci. Tech.* **59**, 37–49.
- Calanca P., Smith P., Holzkamper A. & Ammann C., 2011. *Rech. Agron. Sui.* **2**, 176–183.
- Daget P. & Poissonet J., 1971. Une méthode d'analyse phytologique des prairies. Critères d'application. *Annales Agronomiques* **22**, 5–41.
- Doorenbos J. & Kassam A. H., 1979. FAO Irrigation and Drainage Paper n° 33. Rome, FAO.
- Dumont B., Andueza D., Niderkorn V., Lüscher A., Porqueddu C. & Picon-Cochard C., 2015. A meta-analysis of climate change effects on forage quality in grasslands: specificities of mountain and Mediterranean areas. *Grass Forage Sci.* **70**, 239–254.
- Gilgen A. K. & Buchmann N., 2009. Response of temperate grasslands at different altitudes to simulated summer drought differed but scaled with annual precipitation. *Biogeosciences* **6**, 2525–2539.
- Granier A., Reichstein M., Bréda N., Janssens I. A., Falge E., Ciais P., Grünwald T., Aubinet M., Bernhofer C. *et al.* Evidence for soil water control on carbon and water dynamics in European forests during the extremely dry year: 2003. *Agricultural and Forest Meteorology* **143**, 123–145.
- Grant K., Kreyling J., Dienstbach L. F. H., Beierkuhnlein C. & 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.* **11**–22.
- Halim R. A., Buxton D. R., Hattendorf M. J. & Carlson R. E., 1989. Water-Stress Effects on Alfalfa Forage Quality after Adjustment for Maturity Differences. *Agron. J.* **81**, 189–194.
- Jensen K. B., Waldron B. L., Peel M. D. & Robins J. G., 2010. Nutritive value of herbage of five semi-irrigated pasture species across an irrigation gradient. *Grass Forage Sci.* **65**, 92–101.
- Küchenmeister K., Küchenmeister F., Kayser M., Wrage-Mönnig N. & Isselstein J., 2013. Influence of drought stress on nutritive value of perennial forage legumes. *Int. J. Plant Prod.* **7**, 693–710.
- Lemaire G. & Gastal F., 1997. N uptake and distribution in plant canopies. In: Diagnosis on the nitrogen status in crops (Ed. G. Lemaire). Springer-Verlag, Heidelberg, 3–43.
- Lemaire G. & Pflimlin A., 2007. Les sécheresses passées et à venir: quels impacts et quelles adaptations pour les systèmes fourragers? *Fourrages* **190**, 163–180.
- Meisser M., Deléglise C., Mosimann E., Signarbieux C., Mills R., Schlegel P., Buttler A. & Jeangros B., 2013. Effets d'une sécheresse estivale sévère sur une prairie permanente de montagne du Jura. *Rech. Agron. Sui.* **4**, 476–483.
- Mosimann E., Meisser M., Deléglise C. & Jeangros B., 2012. Potentiel fourragère des pâturages du Jura. *Rech. Agron. Sui.* **3**, 516–523.
- Mosimann E., Deléglise C., Demenga M., Frund D., Sinaj S. & Charles R., 2013. Disponibilité en eau et production fourragère en zone de grandes cultures. *Rech. Agron. Sui.* **4**, 468–475.
- Vicca S., Gilgen A. K., Serrano M. C., Dreesen F. E., Dukes J. S., Estiarte M., Gray S. B., Guidolotti G., Hoepfner S. S., Leakey A. D. B., Ogaya R., Ort D. R., Ostrogovic M. Z., Rambal S., Sardans J., Schmitt M., Siebers M., van der Linden L., van Straaten O., Granier, A., 2012. Urgent need for a common metric to make precipitation manipulation experiments comparable. *New Phytologist*, **195**: 518–522.
- Vogel A., Scherer-Lorenzen M. & Weigelt A., 2012. Grassland Resistance and Resilience after Drought Depends on Management Intensity and Species Richness. *PLoS ONE* **7**, e36992. doi:36910.31371/journal.pone.0036992.

Riassunto**Eventi di siccità: caratteristiche ed effetti sui servizi agronomici dei prati**

Il paragone di eventi di siccità (simulati o naturali) richiede criteri comuni che riflettano lo stress «percepito» dalle piante. Questo studio valuta la pertinenza di diversi indici per esprimere il grado di severità dei periodi di deficit idrico. Le riflessioni relative agli indici si basano sui risultati dei test di siccità (simulazioni sotto serre a tunnel) condotti da Agroscope tra il 2012 e il 2014 su prati intensivi situati tra i 470 e i 1200 metri di altitudine. Gli indici basati sui soli parametri climatici non sono adatti a descrivere l'intensità di un trattamento di siccità. Il deficit teorico ($P - ETP$), ad esempio, non permette di esprimere l'intensità dello stress «percepito» dalle piante, in quanto non considera le relazioni tra la vegetazione e il suolo. Gli indici basati sull'acqua disponibile nel suolo si rivelano più pertinenti e consentono di spiegare meglio gli scarti di resa tra gli appezzamenti esposti a siccità e quelli debitamente riforniti d'acqua. Nell'ambito dei nostri test, gli scarti di resa sono oscillati dal 13 al 60 %, a seconda delle situazioni.

Gli effetti della siccità sul valore nutritivo sono più difficili da determinare rispetto agli effetti sulla resa. Gli indici summenzionati non permettono di spiegare le variazioni osservate nel valore nutritivo. Lo stress idrico, infatti, influisce sulla vegetazione o il suo ambiente tramite processi che talvolta agiscono in maniera contrastante sulla qualità del foraggio. Nonostante ciò, in assenza di un cambiamento di rilievo della composizione botanica, la siccità si ripercuote molto meno sulla qualità del foraggio che sulla resa.

Summary**Drought events: characterisation and effects on grassland agronomic services**

The comparison of drought events requires common criteria reflecting the stress 'experienced' by plants. This study evaluates the relevance of different indices for the characterization of the intensity of drought stress. The reflections concerning the indices are based on the results of drought trials (simulations with rain-out shelters) conducted by Agroscope between 2012 and 2014 on intensively managed grasslands situated at an altitude of between 470 and 1200 m. The indices based solely on climatic parameters are inadequate for describing the intensity of a drought treatment. The balance between evapotranspiration and precipitation ($P - ETP$), for example, does not permit us to characterise the intensity of the stress 'experienced' by plants, since it does not take into account the relationships between vegetation and soil. The indices based on the ratio between the actual water reserve in soil and the available water capacity are more relevant, and allow a better explanation of the yield gap between the plots exposed to drought and those properly supplied with water. In our trials, the yield gaps varied between 13 % and 60 %, depending on the situation.

The effects of drought on the nutritive value are more difficult to pinpoint than the effects of drought on yield. The aforementioned indices do not permit an explanation of the observed variations in nutritional value. Drought affects vegetation and/or the environment via different processes, which may influence in an antagonistic way the quality of the forage. Despite this, in the absence of a major change in botanic composition, drought has much less impact on the quality of forage than on yield.

Key words: drought stress, plant available water, precipitation manipulation experiments, grassland, nutritive value.