

Analyse multi-facteurs de la qualité des ensilages issus des prairies permanentes à utilisation intensive

Elisa Manzocchi¹, Olivier Huguenin-Elie², Massimiliano Probo³, Ueli Wyss^{1,4}

¹Nutrition et émissions des ruminants, Agroscope, 1725 Posieux, Suisse

²Production fourragère et systèmes herbagers, Agroscope, 8046 Zürich, Suisse

³Systèmes pastoraux, Agroscope, 1725 Posieux, Suisse

⁴1723 Marly, Suisse

Renseignements : Elisa Manzocchi, e-mail: elisa.manzocchi@agroscope.admin.ch

<https://doi.org/10.34776/afs15-29> Date de publication: 21. Février 2024



Les ensilages d'herbe issus des prairies permanentes à utilisation intensive représentent une source très importante de fourrages pour les ruminants dans les systèmes de production herbagers (Photo: Agroscope, G. Brändle)

Résumé

Les prairies permanentes constituent l'essentiel de la surface agricole utile en Suisse. Leur composition botanique est variée, tout comme la qualité du fourrage récolté sur ces prairies. Dans le cadre de ce projet, 159 échantillons de fourrage vert ont été prélevés sur des prairies permanentes à utilisation intensive afin d'étudier l'aptitude à l'ensilage et la qualité fermentaire de l'ensilage obtenu à différents cycles de végétation avec des prairies permanentes de différents

types botaniques selon un calendrier des fauches proche de la pratique. Les échantillons de fourrage ont été collectés en 2018 et 2019, du premier au cinquième cycle de végétation, sur un total de 21 prairies réparties dans toute la Suisse qui ont été attribuées à l'un des six types de composition botanique selon la classification des prairies de l'Association pour le Développement de la Culture Fourragère (ADCF). Les échantillons de fourrage ont été préfanés et ensilés dans des silos de laboratoire. Avant l'ensilage, des échantillons ont été prélevés pour déterminer les teneurs en matière sèche et la composition chimique. Après une période de 90 jours de conservation en silo, les teneurs en matière sèche, la composition chimique, le pH et les teneurs en acides gras volatils, alcools et ammoniac ont été analysés afin de caractériser la qualité de l'ensilage. Une analyse des corrélations entre les différents produits fermentaires des ensilages et une analyse factorielle multiple (AFM) ont été réalisées sur l'ensemble des données. Les résultats montrent la grande variabilité des caractéristiques des ensilages issus des prairies permanentes à utilisation intensive qui reste en bonne partie inexpliquée par les facteurs pris en compte dans cette étude. Le cycle de végétation et le stade de développement, strictement liés dans la pratique d'exploitation des prairies, ainsi que le taux de matière sèche sont entre autres les facteurs déterminants de la capacité fermentaire des herbages et du déroulement des fermentations. Néanmoins, d'autres facteurs d'influence sur la qualité des ensilages issus des prairies permanentes comme par exemple la microflore épiphyte restent à explorer.

Key words: Permanent grasslands, silage quality, botanical composition, growth cycle, organic acids.

Introduction

58 % de la surface agricole utilisée en Suisse est constituée de prairies permanentes. Selon la définition, les prairies sont considérées comme permanentes après avoir existé sous la forme de prairies depuis plus de 6 ans (RS 910.91). La composition botanique de la communauté végétale des prairies permanentes varie fortement en fonction des conditions pédoclimatiques et de l'intensité d'utilisation (Lüscher *et al.*, 2019). Les rendements et la qualité des fourrages dépendent ainsi de nombreux facteurs d'influence et de leurs multiples interactions, comme le climat, la disponibilité des nutriments dans le sol et la composition botanique de la prairie (Perotti *et al.*, 2020) ainsi que le stade phénologique des plantes au moment des utilisations, en particulier le stade des espèces dominantes dans la prairie (Buxton, 1996). La conservation des fourrages sous forme d'ensilage entraîne d'autres facteurs d'influence sur la valeur nutritive du fourrage tel qu'il est affouragé à la crèche. En effet, le processus de fermentation, et donc les caractéristiques fermentaires de l'ensilage qui en résulte sont également influencés par de nombreux facteurs, dont la composition chimique et morphologique du fourrage vert, la présence de micro-organismes épiphytes (bactéries, levures et moisissures), les conditions et le degré de préfanage, la technique d'ensilage (longueur des brins, compactage, herméticité et utilisation d'agents d'ensilage) ainsi que la gestion du silo à la reprise et à l'affouragement. Les sucres hydrosolubles sont le principal substrat des organismes fermentaires et leur concentration et biodisponibilité dans le fourrage vert déterminent le déroulement des fermentations, la formation d'acides gras volatils et d'alcools principalement et la conséquente acidification. En outre, la présence de protéines à haut pouvoir tampon et d'autres composés (par exemple les nitrates) influencent les fermentations, l'acidification du fourrage et la qualité fermentaire de l'ensilage qui en résulte. Les études et observations réalisées sur le terrain jusqu'à présent ont montré que les ensilages issus de prairies permanentes à forte proportion en dicotylédones non-légumineuses en particulier dans les régions de montagne présentent souvent une moindre qualité fermentaire et des valeurs nutritives relativement faibles (Wyss *et al.*, 2016). La question se pose de savoir si cela est dû à la composition botanique des herbages et aux conditions de croissance du fourrage au cours de la saison ou si cela est dû aux techniques de récolte et d'ensilage. En particulier, les ensilages d'herbe conservés en automne et ayant une teneur en matière azotée (MA) plus élevée seraient particulièrement sen-

sibles aux mauvaises fermentations. Pour répondre à cette question, des échantillons de fourrage vert ont été récoltés sur de nombreuses prairies permanentes à utilisation intensive puis ensilés en laboratoire afin d'étudier l'aptitude à l'ensilage et la qualité fermentaire de l'ensilage obtenu à différents cycles de végétation avec des prairies permanentes de différents types botaniques et un calendrier de fauches proche de la pratique de gestion courante en Suisse.

Matériel et méthodes

Dispositif de prairies et production des ensilages

En 2018 et 2019, des échantillons de fourrage vert ont été collectés sur un total de 21 prairies permanentes en Suisse, du premier au cinquième cycle de végétation. Les sites choisis présentaient des conditions climatiques et édaphiques différentes afin de représenter au mieux l'éventail des conditions pédoclimatiques observées en Suisse. Les prairies permanentes se trouvaient à des altitudes comprises entre 440 et 1000 m et ont été fertilisées selon les principes de la fertilisation des cultures agricoles (PRIF; Huguenin-Elie *et al.*, 2017). Les parcelles ont été attribuées visuellement selon la typologie des prairies ADCF aux types équilibré (E; 50–70 % de graminées), équilibré à dominance de ray-grass (ER), riche en graminées (G; >70 % de graminées) et riche en graminées à dominance de ray-grass (GR; >70 % de graminées, dont plus de 50 % de ray-grass). Sur 14 sites en 2018 et 19 sites en 2019, des échantillons ont été prélevés au moment de la fauche (hauteur de fauche: 6–7 cm), sur trois répétitions (1 m × 5 m) par site, pour un total de 159 échantillons de fourrage vert obtenus pendant les deux années de l'essai. Le stade de développement des graminées [1 (tallage) – 7 (fructification)] a aussi été déterminé lors de la fauche selon le système de l'ADCF (Fiche technique 2.7.1).

Les échantillons de fourrage vert préfanés ont été hachés à 2 cm et ensilés séparément par répétition dans des silos de laboratoire de 1,5 litre (Weck, Landi, Suisse). Les silos ont été pesés lors de l'ensilage et 90 jours après et les pertes de gaz de fermentation ont été calculées à partir de la différence de poids. Après 90 jours, les silos ont été ouverts et les échantillons pour la détermination de la composition chimique et des caractéristiques fermentaires ont été prélevés et analysés à l'état frais [pH, ammoniac (NH₃), acides gras volatils et alcools] ou séchés à 60 °C pendant 16 heures puis broyés dans un broyeur rotatif (tamis de 1 mm).

Analyse de la qualité des fourrages

La teneur en matière sèche (MS) des fourrages verts et des ensilages a été déterminée par pesage avant et après séchage à 60°C pendant 16 heures et à 105°C pendant 3 h. Les teneurs en cendres brutes (CE), constituants organiques [matière azotée (MA), cellulose brute (CB), matière grasse (MG), sucres totaux solubles dans l'éthanol et sucres totaux hydrosolubles (WSC)] et pariétaux [fibres insolubles dans les détergents neutres (aNDF_{om}), fibres insolubles dans les détergents acides (ADF_{om}) et lignine (ADL)] des fourrages verts et des ensilages ont été analysées par spectroscopie proche infrarouge (SPIR) à l'aide d'un appareil FT-NIR (NIRFlex N-500, Büchi Labor Technik AG, Flawil, Suisse) selon Ampuero-Kragten et Wyss (2014). La digestibilité de la matière organique (dMO) des fourrages verts a aussi été estimée par SPIR selon une méthode interne (Ampuero *et al.*, 2020). Les équations utilisées pour estimer la dMO à partir des spectres infrarouges se basent sur la détermination *in vivo* de la dMO avec des moutons castrés adultes de 100 types de fourrages depuis 1990 à Agroscope (Ampuero *et al.*, 2020).

Pour caractériser l'aptitude à la fermentation des fourrages verts, la capacité tampon (CT) a été déterminée par titration comme la quantité d'acide lactique 0,5 M nécessaire pour atteindre pH 4. La teneur en nitrate (NO₃⁻) a été analysée par chromatographie en phase gazeuse. Le coefficient de fermentescibilité (CF) a été calculé à partir de la teneur en MS, de la teneur en sucres hydrosolubles et de la CT selon Weissbach et Honig (1992). Un CF > 45 indique des substrats facilement fermentescibles, des substrats moyennement fermentescibles ont un CF compris entre 35 et 45, et des substrats difficilement fermentescibles ont un CF < 35 (Weissbach et Honig, 1992). Dans les ensilages, pH et NH₃ ont été déterminés avec deux électrodes après filtration du jus d'ensilage. Les concentrations d'acides gras volatils (acide lactique, acétique, propionique et butyrique) et d'alcools (éthanol, 1-propanol, butanol, 1,2-propanediol et 2,3-butanediol) ont été analysées par chromatographie en phase liquide à haute performance sur une colonne échangeuse d'ions. En outre, la qualité fermentaire des ensilages a été évaluée selon le système de points de la Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft (DLG; Pahlow et Weissbach, 1999). Des points sont attribués pour les teneurs en acide butyrique et acétique ainsi que pour les valeurs de pH en fonction de la teneur en MS de l'ensilage. Un ensilage de très bonne qualité atteint entre 90 et 100 points DLG. Un score entre 72 et 89 indique un bon ensilage, un score entre 52 et 71 indique un ensilage de qualité moyenne, et un ensilage avec un score

inférieur à 51 est considéré comme mauvais, voire très mauvais avec moins de 30 points DLG.

Analyse des données

Le jeu de données a été analysé en utilisant R (version 4.1.2, R Core Team). Les données obtenues pour les trois répétitions par site, cycle de végétation et année ont été moyennées pour obtenir au total 53 ensilages considérés comme unités statistiques. Au total, 24 ensilages du 1^{er} cycle, 10 du 2^e cycle, 8 du 3^e cycle, 6 du 4^e cycle, et 5 du 5^e cycle de végétation étaient inclus dans le jeu de données. Trois niveaux de la variable qualitative cycle de végétation ont donc été définis: 1^{er} cycle, 2^e+3^e cycles, et 4^e+5^e cycles. Cela se justifie parce que le 1^{er} cycle est le cycle génératif pour les graminées, les 2^e et 3^e cycles les cycles d'été et les 4^e et 5^e cycles les cycles d'automne. 29 ensilages de prairies de type E, dix ensilages de prairies de type E_R, huit ensilages de prairies type G et six ensilages de prairies de type G_R ont été obtenus. Les statistiques descriptives ont été calculées pour chaque variable quantitative, toutes variables qualitatives confondues. De plus, des corrélations de Pearson entre les variables quantitatives sélectionnées caractérisant la qualité fermentaire des ensilages ont été calculées avec la fonction `corr.test` et représentées sous forme de matrice de corrélation avec la fonction `corrplot`.

Une analyse factorielle multiple (AFM) a été réalisée à l'aide du package `FactoMineR` (Lê *et al.*, 2008) et visualisée avec le package `factoextra` (Kassambara et Mundt, 2020). L'AFM est une méthode d'analyse de données multivariée conceptuellement similaire à l'analyse des composantes principales (ACP) permettant de résumer et de visualiser des jeux de données complexes, dans lesquels les individus sont décrits par plusieurs ensembles de variables quantitatives et/ou qualitatives structurées en groupes (Pagès, 2002). L'AFM sert à résumer les mesures de nombreuses variables différentes et à les réduire à quelques facteurs principaux sous-jacents. Cela permet d'étudier les similarités entre individus (*i.e.* ensilages) par rapport aux variables (*i.e.* constituants organiques et pariétaux, produits fermentaires) incluses dans un jeu de données, étudier les relations entre variables et caractériser les individus en termes de ces variables. Pour cela, toutes les variables quantitatives sont ramenées à une variance unitaire. L'adéquation des données pour l'AFM a été vérifiée à l'aide de la mesure Kaiser-Meyer-Olkin (KMO). Seules les variables caractérisant la composition chimique des fourrages verts et la qualité fermentaire des ensilages présentant un KMO supérieur à 0,60 ont été prises en compte pour l'AFM. Des ellipses de confiance autour des barycentres des modalités des

variables qualitatives ont été estimées avec un niveau de confiance fixé à 95 % avec la fonction plot.ellipses et représentées dans la figure 3. Les ellipses de confiance permettent de voir si les modalités d'une variable qualitative (i.e. cycle de végétation, stade de développement, et type botanique) sont significativement différentes les unes des autres à un niveau de confiance de 95 %.

Résultats et discussion

Caractéristiques des fourrages verts

Le tableau 1 présente les caractéristiques des fourrages préfanés avant l'ensilage lors de l'essai. Les échantillons de fourrage ont été ensilés avec un taux moyen en MS de $33 \pm 9,5\%$ (moyenne \pm erreur type) et contenaient en moyenne $100 \pm 3,2$ g de CE par kg de MS.

En accord avec les teneurs très variables en constituants pariétaux (CB $234 \pm 5,5$ g/kg MS, NDF $478 \pm 8,9$ g/kg MS, ADF $274 \pm 5,5$ g/kg MS, ADL $30,8 \pm 1,18$ g/kg MS), la dMO des fourrages verts variait de 53 % à 81 %, avec une dMO moyenne de tous les échantillons de $70 \pm 0,9\%$. La teneur en MA ($N \times 6,25$) était en moyenne de $149 \pm 4,0$ g/kg MS. La teneur en nitrate (NO_3^- ; $1,2 \pm 0,30$ g/kg MS) dans les fourrages verts variait entre des valeurs inférieures

Tableau 1 | Statistiques descriptives (minimum, médiane, moyenne et maximum) de la composition chimique des échantillons de fourrage vert préfané ($n = 159$) provenant d'un total de 21 prairies permanentes à utilisation intensive en Suisse récoltés en 2018 et 2019.

		Min.	Médiane	Moy.	Max.
Matière sèche	%	18,2	30,9	33,1	67,7
Cendres brutes	g/kg MS	47,1	98,8	100	157
Matière organique	g/kg MS	843	901	900	953
Matière azotée (MA)	g/kg MS	101	142	149	244
Cellulose brute (CB)	g/kg MS	145	242	234	325
aNDF _{om} ¹	g/kg MS	338	481	478	617
ADF _{om} ²	g/kg MS	190	279	274	373
ADL ³	g/kg MS	13,9	29,9	30,8	61,4
Sucres ⁴	g/kg MS	34	114	113	197
Sucres hydrosolubles	g/kg MS	46	104	109	195
Matière grasse	g/kg MS	21,9	35,2	36,7	53,5
Nitrate (NO_3^-)	g/kg MS	<0,02	0,30	1,20	15,9
Capacité tampon	g acide lactique/kg MS	15,8	57,1	58,5	97,1
CF ⁵	–	28,6	48,8	49,3	84,9
dMO _{SPIR} ⁶	%	53,5	69,5	69,7	81,8

¹aNDF_{om}: Fibres insolubles dans détergents neutres, analysés selon van Soest (1991)

²ADF_{om}: Fibres insolubles dans détergents acides, analysés selon van Soest (1991)

³ADL: Lignine, analysés selon van Soest (1991)

⁴Sucres totaux solubles dans l'éthanol

⁵CF: Coefficient de fermentescibilité = $\text{MS} (\%) + 8 \times \text{Sucres hydrosolubles (g/kg MS)} / \text{Capacité tampon (g acide lactique/kg MS)}$ selon Weissbach et Honig (1992)

⁶dMO_{SPIR}: digestibilité de la matière organique du fourrage vert estimé par spectrométrie du proche infrarouge selon Ampuero *et al.* (2020)

Tableau 2 | Valeurs moyennes (\pm erreur type) de pH, teneurs en acides gras volatils, rapport azote ammoniacal sur azote total et points DLG des ensilages ($n = 53$) issus de prairies permanentes à utilisation intensive classifiés selon leur fermentescibilité (Weissbach et Honig, 1992).

Fermentescibilité des fourrages verts		Bonne	Moyennement bonne	Mauvaise
Nombre d'ensilages		35	14	4
MS _{corr}	%	$35,8 \pm 1,6$	$25,6 \pm 1,2$	$25,2 \pm 1,1$
pH	–	$4,9 \pm 0,09$	$4,8 \pm 0,12$	$5,5 \pm 0,30$
Acide lactique	g/kg MS	$47,1 \pm 4,56$	$61,8 \pm 7,10$	$49,2 \pm 25,3$
Acide acétique	g/kg MS	$14,9 \pm 2,09$	$25,1 \pm 3,16$	$24,1 \pm 9,24$
Acide propionique	g/kg MS	$0,3 \pm 0,10$	$1,7 \pm 0,85$	$1,3 \pm 0,50$
Acide butyrique	g/kg MS	$4,3 \pm 1,11$	$14,9 \pm 4,22$	$14,7 \pm 7,77$
NH ₃ -N:N-total ¹	%	$6,8 \pm 0,3$	$10,6 \pm 1,2$	$11,5 \pm 1,9$
Points DLG ²	0–100	78 ± 3	52 ± 7	44 ± 15

¹Rapport azote ammoniacal sur azote total

²Système d'évaluation de la qualité fermentaire des ensilages par la Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft

à la limite de quantification (0,02 g/kg; 7 % de tous les fourrages verts) à un maximum de 15 g/kg de MS. Les échantillons de fourrage issus des 4^e et 5^e cycles de végétation avaient en moyenne des teneurs en NO_3^- plus élevées que les échantillons des trois premiers cycles de végétation. Le NO_3^- est assimilé par les plantes et s'accumule lorsque l'absorption est supérieure à la capacité d'assimilation des plantes qui est fortement influencée, entre autres, par les conditions météorologiques et par la disponibilité en oligo-éléments dans la plante. De plus, les concentrations en NO_3^- sont généralement plus élevées aux stades phénologiques jeunes et diminuent avec l'avancement du stade phénologique, en particulier dans les graminées.

Le coefficient de fermentescibilité (CF) selon Weissbach et Honig (1992) était supérieur à 35 pour 92 % des échantillons de fourrage vert, ce qui signifie que seuls 8 % des échantillons issus du dispositif de prairies permanentes présentaient un manque de substrats fermentescibles et ont été classés comme difficiles à ensiler (tableau 2). Plus de deux tiers des échantillons (69 %) ont été classés comme des substrats faciles à ensiler.

Caractéristiques des ensilages

Les ensilages expérimentaux avaient un taux de MS corrigé par les pertes de produits fermentaires (MS_{corr}) de $32 \pm 1,3\%$ et un pH de $4,9 \pm 0,08$ (tableau 3).

En moyenne, les ensilages n'étaient donc pas de très bonne qualité. Pour un ensilage de bonne qualité avec 32 % de MS, un pH inférieur à 4,7 serait à atteindre pour garantir une bonne conservation. La teneur de NH_3 dans

les ensilages était de $0,8 \pm 0,04$ g/kg MS en moyenne. En moyenne, les ensilages contenaient $51 \pm 4,0$ g/kg de MS d'acide lactique, $18 \pm 1,8$ g/kg de MS d'acide acétique, $0,7 \pm 0,25$ g/kg de MS d'acide propionique et $7,9 \pm 1,57$ g/kg de MS d'acide butyrique. La teneur en éthanol variait également parmi les ensilages, avec une moyenne de $12,2 \pm 0,75$ g/kg MS. Les concentrations de 1,2-propanediol ($3,2 \pm 0,58$ g/kg MS) et de 2,3-butanediol ($5,9 \pm 0,82$ g/kg MS) variaient aussi entre les ensilages expérimentaux. La figure 1 représente les corrélations entre variables de la qualité fermentaire des ensilages. La teneur de 1,2-propanediol était positivement corrélée avec les teneurs d'acide lactique ($r=0,46$, $P<0,001$) et acide acé-

tique ($r=0,35$, $P=0,009$). Le 1,2-propanediol est produit par plusieurs micro-organismes, y compris des espèces de clostridies et de levures, mais dans les ensilages le 1,2-propanediol pourrait résulter typiquement du métabolisme de l'acide lactique par *Lactobacillus buchneri* présent aussi naturellement dans les herbages (Kung *et al.*, 2018).

La teneur de 2,3-butanediol était positivement corrélée avec la teneur en éthanol ($r=0,37$, $P=0,006$) et en acide butyrique ($r=0,54$, $P<0,001$) mais n'était pas corrélée avec les teneurs en acide lactique et acétique. Le 2,3-butanediol est un produit de la fermentation de la cellulose et hémicellulose principalement par les bacté-

Tableau 3 | Statistiques descriptives (minimum, médiane, moyenne et maximum) de la composition chimique et des caractéristiques fermentaires des ensilages (n=53) provenant d'un total de 21 prairies permanentes à utilisation intensive en Suisse récoltés en 2018 et 2019 et les valeurs indicatives de bonne qualité des ensilages d'herbe issues de la littérature. Les valeurs de trois répétitions par site, cycle de végétation et année ont été moyennées.

		Min.	Médiane	Moy.	Max.	Valeurs indicatives ¹
MS _{corr} ²	%	19,7	30,1	32,3	63,6	35–45
Cendres brutes	g/kg MS	65,6	95,0	103	195	< 100
Constituants organiques						
Matière organique	g/kg MS	835	900	900	949	–
Matière azotée	g/kg MS	119	151	160	252	150–200
Cellulose brute	g/kg MS	156	242	235	315	200–250
aNDF _{om} ³	g/kg MS	301	443	436	549	–
ADF _{om} ⁴	g/kg MS	189	270	269	337	–
ADL ⁵	g/kg MS	4,0	19,3	20,4	51,7	–
Matière grasse	g/kg MS	24,9	39,5	40,1	72,4	–
Sucres ⁶	g/kg MS	6,3	30,9	42,8	103	–
Sucres hydrosolubles	g/kg MS	0,7	46,5	52,2	112	–
Caractéristiques fermentaires						
pH		4,1	4,8	4,9	6,4	4,3–4,7
Acides gras volatils						
Acide lactique	g/kg MS	1,1	50,2	51,1	122,6	50–100
Acide acétique	g/kg MS	1,4	14,5	18,3	52,0	<30
Acide propionique	g/kg MS	0	0	0,7	11,7	<0,1
Acide butyrique	g/kg MS	0,0	2,5	7,9	51,3	0
Alcools						
Ethanol	g/kg MS	2,7	12,2	12,2	29,7	<10
1-Propanol	g/kg MS	0,0	0,8	2,4	19,4	–
1,2-Propanediol	g/kg MS	0,0	1,5	3,2	17,1	–
Butanol	g/kg MS	0,0	0,0	0,0	0,5	–
2,3-Butanediol	g/kg MS	0,0	4,2	5,9	29,3	–
NH ₃ -N	g/kg MS	0,4	0,7	0,8	2,2	–
NH ₃ -N:N-totale	%	2,9	7,3	8,1	21,3	<10
Pertes de gaz ⁷	%	1,2	3,8	4,3	9,9	–
Points DLG	0–100	8	79	69	98	–

¹Valeurs indicatives des ensilages d'herbe de bonne qualité adaptées de Kung *et al.* (2018)

²MS_{corr}: Matière sèche corrigée par les pertes de produits fermentaires

³aNDF_{om}: Fibres insolubles dans détergents neutres, analysés selon van Soest (1991)

⁴ADF_{om}: Fibres insolubles dans détergents acides, analysés selon van Soest (1991)

⁵ADL: Lignine, analysés selon van Soest (1991)

⁶Sucres solubles dans l'éthanol

⁷Pertes de gaz exprimées en % du poids initial du fourrage ensilé

ries lactiques, mais aussi par des entérobactéries (par exemple *Klebsiella* sp., *Bacillus* sp.) si présentes dans le substrat (Garg et Jain, 1995). Les entérobactéries produisent aussi l'acide acétique et l'éthanol (McDonald et al., 1991). L'activité des entérobactéries pourrait donc expliquer en partie la corrélation observée entre les teneurs en 2,3-butanediol et en éthanol. Néanmoins, l'éthanol est aussi un produit des levures et des bactéries lactiques hétérofermentaires. Le rapport $\text{NH}_3\text{-N}$ sur N-total, un indicateur du degré de dégradation des protéines dans l'ensilage (protéolyse), était positivement corrélé avec les teneurs en acide propionique ($r=0,62$, $P<0,001$), butyrique ($r=0,69$, $P<0,001$) et 2,3-butandiol ($r=0,60$, $P<0,001$). Ces corrélations pourraient indiquer une activité des clostridies protéolytiques qui fermentent des acides aminés en acides propionique et acétique, NH_3 et dioxyde de carbone (CO_2) en parallèle de l'activité des clostridies saccharolytiques qui fermentent des sucres simples en acide butyrique et CO_2 . Au contraire de ce qui avait été mis en évidence par Wyss et al. (2016), la teneur en cendres n'était pas significativement corrélée avec les teneurs en acide butyrique dans les ensilages ($r=0,20$, $P=0,13$) dans ce jeu de données.

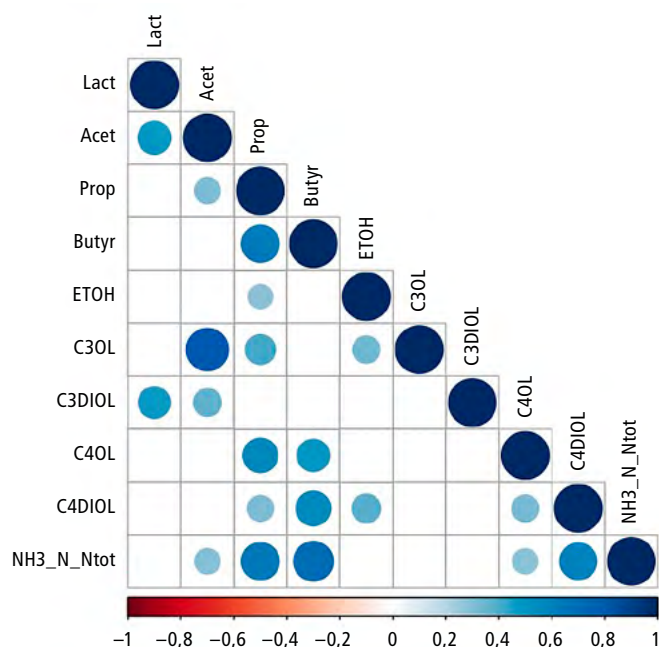


Figure 1 | Matrice de corrélation entre caractéristiques fermentaires des ensilages ($n=53$). Seules les corrélations de Pearson significatives ($P<0,05$) sont affichées. Plus le point est grand et de couleur foncée, plus le coefficient de corrélation est élevé. Lact: acide lactique, Acet: acide acétique, Prop : acide propionique, Butyr: acide butyrique; ETOH: éthanol, C3OL: 1-propanol, C3DIOL: 1,2-propanediol; C4OL: butanol; C4DIOL: 2,3-butanediol; $\text{NH}_3\text{-N}$: rapport azote ammoniacal sur azote total.

Compte tenu des résultats obtenus sur les caractéristiques fermentaires des ensilages et le coefficient de fermentescibilité des fourrages verts selon Weissbach et Honig (1992) présentés dans le tableau 2, le coefficient de fermentescibilité s'est confirmé être un bon prédicteur de la qualité des ensilages d'herbe dans ce jeu de données, au vu du pH numériquement plus élevé (+0,6), et des teneurs numériquement plus élevées en acides acétique (+9,2 g/kg de MS), propionique (+1,0 g/kg de MS) et butyrique (+10,4 g/kg de MS) et d'une protéolyse plus avancée (+5,7 %) dans les ensilages issus des échantillons de fourrage vert classés comme ayant une mauvaise fermentescibilité par rapport à ceux classés comme facilement fermentescibles. Les fourrages verts classés comme moyennement fermentescibles ont produit des ensilages avec un pH équivalent, mais des teneurs d'acides acétique, propionique et butyrique numériquement plus élevées et une protéolyse plus avancée par rapport aux ensilages issus des fourrages facilement fermentescibles.

Analyse factorielle multiple de la qualité des ensilages

Le graphique des variables obtenu par l'AFM montre la relation entre les variables, la qualité de la représentation des variables sur les dimensions de l'AFM et les corrélations au sein et entre les différents groupes de variables (figure 2). Dans cette figure, les variables positivement corrélées vont dans la même direction et les variables négativement corrélées s'opposent. Les deux premières dimensions de l'AFM décrivent au total seulement 22 % de la variabilité au sein du jeu de données. La première dimension est caractérisée par les teneurs en MA, ADF, et CE et par la dMO du fourrage vert ainsi que la teneur en acide lactique des ensilages. La deuxième dimension est caractérisée principalement par les teneurs en MS_{corr} , éthanol et 1-propanol.

La figure 3 représente les ensilages sur les deux premières dimensions de l'AFM. Les fourrages dont les caractéristiques chimiques et fermentaires incluses dans l'AFM se rapprochent sont proches les uns des autres sur la carte factorielle, au contraire les fourrages avec des caractéristiques divergentes sont éloignés sur la carte factorielle. Les fourrages issus des différents cycles de croissance différaient entre eux. Les fourrages issus des prairies de type E différaient de ceux issus des prairies des types G_R et E_R . En outre, les fourrages des prairies de type E_R différaient de ceux des prairies de type G.

La superposition des graphiques des variables et des facteurs permet les quelques interprétations qui suivent. Une haute teneur en MS_{corr} était associée à des teneurs

plus faibles en acides gras volatils, une faible acidification, et donc à des valeurs de pH plus élevées. Cela s'explique par le fait que le taux en MS du substrat a une grosse influence sur ses caractéristiques fermentaires (Gordon *et al.*, 1961). Par contre, les teneurs en acides gras volatils dans les ensilages étaient positivement corrélées avec des teneurs élevées en sucres hydrosolubles dans les fourrages verts. Le pH était négativement corrélé avec la dMO du fourrage vert parce que les herbages riches en sucres solubles favorisent l'abaissement rapide du pH dans l'ensilage et ont aussi une dMO généralement plus élevée. Les 4^e et 5^e cycles de végétation récoltés à des stades précoces (2,5) étaient associés à des teneurs plus élevées en CE et MA, incluant des teneurs plus élevées en NO₃⁻, et avaient donc une CT plus élevée.

La teneur plus élevée en CE pourrait être expliquée par l'incorporation de terre lors de la fauche relativement précoce de ces herbages ou aux conditions plus humides typiques de l'automne, lors de la récolte du 5^e cycle de végétation en particulier. Les teneurs en constituants pariétaux (CB, NDF, ADF) étaient négativement corrélées avec les teneurs en MA, ce qui est en lien avec l'augmentation des composants pariétaux lors de l'avancement du stade phénologique des herbages et la conséquente diminution de la proportion de MA et MG dans la MS. En fait, dans ce jeu de données, qui reflète bien les pratiques d'exploitation des prairies permanentes à utilisation intensive en Suisse, l'effet du cycle de végétation est confondu avec le stade de développement des graminées au moment de la fauche avec une utilisation plus

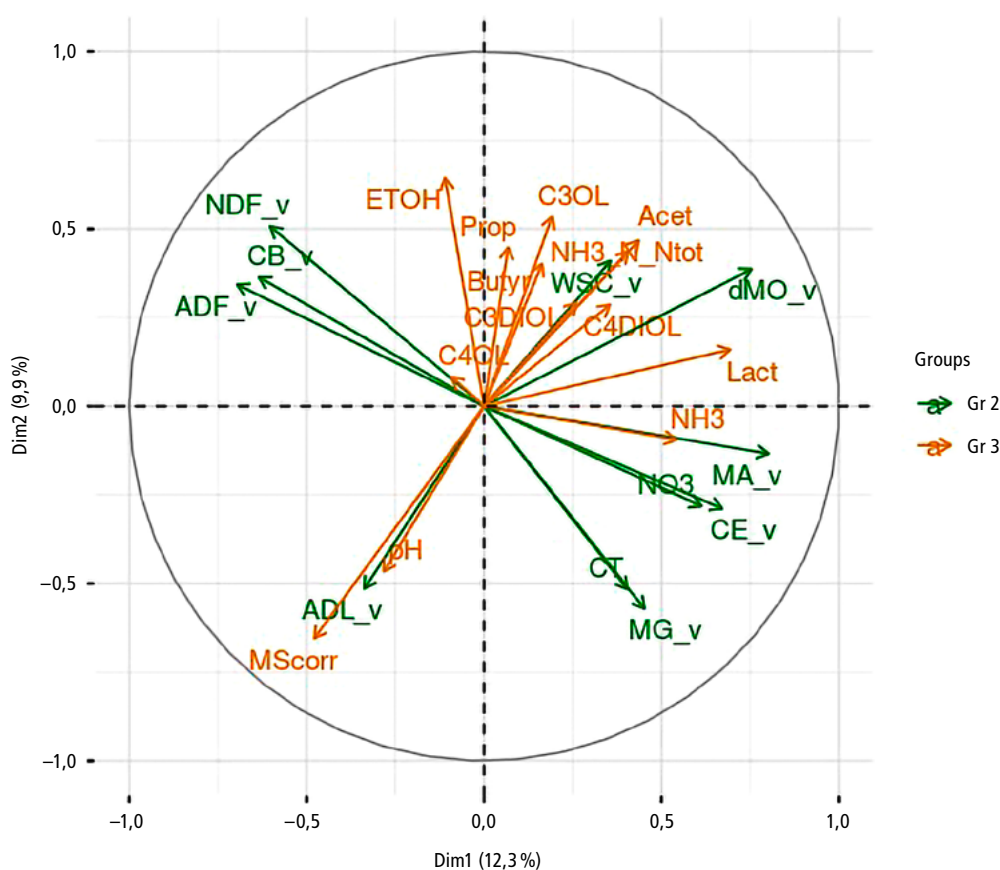


Figure 2 | Carte factorielle représentant les variables quantitatives qui caractérisent les fourrages verts d'origine (en vert) et la qualité fermentaire des ensilages (en orange) sur les deux premières dimensions de l'analyse multifactorielle (AMF). Chaque flèche représente une variable quantitative. Les variables positivement corrélées vont dans la même direction, les variables négativement corrélées s'opposent. La longueur des flèches indique la qualité de la représentation des variables sur la carte factorielle. Plus la flèche est longue et mieux la variable est représentée sur la carte factorielle. Acet: acide acétique; Butyr: acide butyrique; C3DIOL: 1,2-propanediol; C4OL: butanol; C4DIOL: 2,3-butandiol; CB: cellulose brute; CE: cendres brutes; CT: capacité tampon; ETOH: éthanol; C3OL: 1-propanol; Lact: acide lactique; MA: matière azotée; MG: matière grasse; NH3_N_Ntot: rapport azote ammoniacal sur azote total; NH3: ammoniac; NO3: nitrate; Prop: acide propionique; WSC: sucres hydrosolubles.

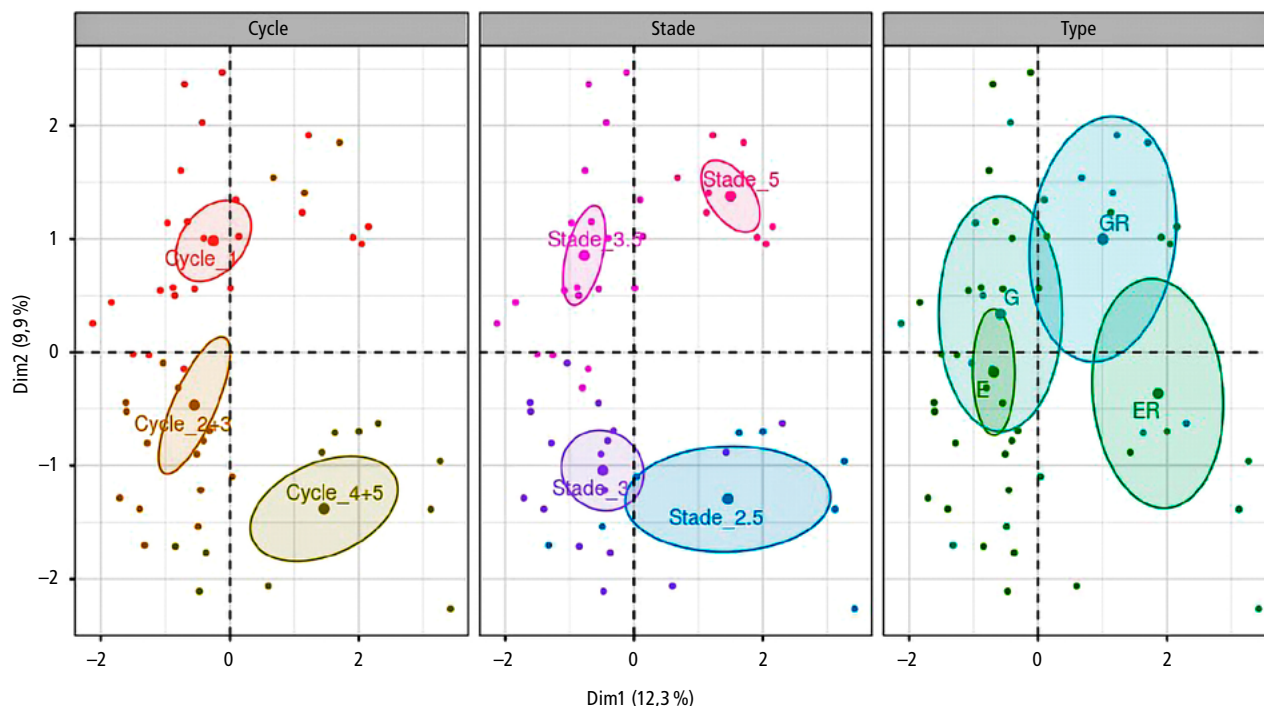


Figure 3 | Graphique des facteurs représentant les ensilages sur les deux premières dimensions de l'analyse factorielle multiple. Chaque point représente un ensilage ($n=53$) résultant des trois répétitions par site, cycle de végétation, et année. Les mesures ont été faites sur différents types de prairies et cycles de végétation, à différents stades de développement des graminées principales. Les ensilages ayant des profils similaires sont proches les uns des autres. Les ellipses représentent les barycentres des différents cycles de végétation, stades de développement des graminées au moment de la fauche et types de prairie avec un niveau de confiance fixé à 95 %.

précoce (stade 2,5) associée aux deux derniers cycles de végétation de la saison (4^e + 5^e cycles). Une différenciation entre l'effet du cycle de végétation et celui du stade de développement des graminées dominantes au moment de la fauche n'est donc pas possible avec ce jeu de donnée. Néanmoins, les échantillons issus des prairies du type G_R (*i.e.* ceux représentés dans le quadrant en haut à droite dans la Figure 3 – Type) étaient associés à une teneur en sucres hydrosolubles plus élevée, ce qui serait en lien avec une proportion plus élevée de ray-grass, espèce notamment riche en sucres solubles.

Il faut noter que l'échantillonnage du fourrage n'a pas pu être effectué de façon optimale en ce qui concerne la stratification des échantillons en types botaniques, cycles de croissance et niveau de préfanage, ceci à cause de difficultés logistiques. Cet état de fait complique l'analyse et l'interprétation des résultats de cette étude. Un facteur qui n'a pas été pris en compte dans cet essai est la microflore épiphyte (bactéries, levures et moisissures) qui colonise naturellement la surface des plantes et ses interactions avec la composition botanique, le cycle de végétation et le stade de développement, ainsi que la disponibilité de substrats ou d'inhibiteurs dans le fourrage et l'état d'oxydoréduction de l'ensilage. En

fait, cela pourrait jouer un rôle important dans la détermination de la qualité des ensilages et expliquer une partie de la variabilité des caractéristiques fermentaires des ensilages d'herbe qui s'est révélée être grande et qui reste en bonne partie inexpliquée par les facteurs pris en compte dans cet essai. En effet, la charge microbienne naturelle des plantes dans les prairies permanentes est influencée par de nombreux facteurs, notamment les conditions météorologiques et climatiques et la composition botanique (Aydogan *et al.*, 2020). En perspective, une caractérisation des communautés microbiennes des prairies permanentes à utilisation intensive et des facteurs d'influence pourrait apporter de nouveaux éléments pour une meilleure caractérisation de la qualité des ensilages issus de ces prairies.

Conclusions

- Cette étude sur des ensilages provenant des différentes prairies, cycles de végétation et années a montré la grande variabilité des caractéristiques des ensilages produits à partir de fourrages issus de prairies permanentes à utilisation intensive selon les pratiques de gestion courantes en Suisse.

- La composition chimique, en particulier les teneurs en matière sèche et en sucres solubles, donne une indication sur la fermentescibilité des fourrages et permet de prédire la qualité fermentaire des ensilages.
- Toutefois, la variabilité des caractéristiques chimiques et fermentaires des ensilages reste en bonne partie inexplicée par les combinaisons de facteurs pris en compte dans cette étude: cycle de végétation, stade de développement au moment de la fauche et type botanique de la prairie notamment.
- Enfin, la compréhension des mécanismes agroécologiques qui déterminent la composition chimique, le processus de fermentation et la qualité de l'ensilage d'herbe reste importante afin de toujours optimiser la gestion des prairies pour les objectifs recherchés. ■

Remerciements

Les auteurs remercient David Frund, Rafael Gago, Luc Stévenin, et Cornel Johannes Stutz pour les relevés de la composition botanique des parcelles sur les différents sites et pour l'aide lors de la collecte des échantillons, ainsi que les collaborateurs du groupe de chimie des aliments pour animaux pour la réalisation des analyses des fourrages, en particulier Silvia Ampuero pour les analyses SPIR et Catherine Ducrest pour l'analyse des acides gras volatils des ensilages.

Bibliographie

- Association pour le développement de la culture fourragère (ADCF), AGRIDEA. (2021) Fiche technique 2.7.3 Valeur des fourrages – Estimation du fourrage des prairies. Production herbagère.
- Ampuero Kragten, S., Wyss, U. (2014) Futtermittel im Nah-Infrarotlicht (NIRS). *Agrarforschung Schweiz* 5, 204–211.
- Ampuero Kragten, S., Pacheco Aguirre, J.A., Wyss, U., Meisser, M., Probo, M., Huguenin-Elie, O. (2020) Forage organic matter digestibility: NIRS predictions based on in vivo values and standardisation of in vitro determinations. *Grassland Science in Europe* 25, 215–217.
- Aydogan, E. L., Budich, O., Hardt, M., Choi, Y. H., Jansen-Willems, A. B., Moser, G., Müller, C., Kämpfer, P., Glaeser, S. P. (2020). Global warming shifts the composition of the abundant bacterial phyllosphere microbiota as indicated by a cultivation-dependent and independent study of the grassland phyllosphere of a long-term warming field experiment. *FEMS Microbiology Ecology* 96, fiae087.
- Buxton, D.R. (1996) Quality-related characteristics of forages as influenced by plant environment and agronomic factors. *Animal Feed Science and Technology* 59, 37–49.
- Garg, S. K., Jain, A. (1995). Fermentative production of 2,3-butanediol: a review. *Bioresource Technology* 51, 103–109.
- Gordon, C. H., Derbyshire, J. C., Wiseman, H. G., Kane, E. A., Melin, C. G. (1961) Preservation and feeding value of alfalfa stored as hay, haylage and direct-cut silage. *Journal of Dairy Science* 44, 1299–1311.
- Huguenin-Elie, O., Mosimann, E., Schlegel, P., Lüscher, A., Kessler, W., Jeangros, B. (2017) Kapitel 9 – Düngung von Grasland. In: Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD). *Agrarforschung Schweiz* 8 (6): Spezialpublikation.
- Kung, L., Shaver, R. D., Grant, R. J., Schmidt, R. J. (2018) Silage review: Interpretation of chemical, microbial, and organoleptic components of silages. *Journal of Dairy Science* 101, 4020–4033.
- Lê, S., Josse, J., Husson, F., (2008). FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software* 25, 1–18.
- Lüscher, A., Grieder, C., Huguenin-Elie, O., Klaus, V. H., Reidy, B., Schneider, M. K., Schubiger, F., Suter, D., Kölliker, R. (2019). Grassland systems in Switzerland with a main focus on sown grasslands. *Grassland Science in Europe* 24, 3–16.
- McDonald, P., Henderson, A. R., Heron, S. J. E. (1991). The Biochemistry of Silage, 2nd Edition, Chalcombe, Marlow, UK.
- Kassambara, A., Mundt, F. (2020) factoextra: Extract and visualize the results of multivariate data analyses. <https://cloud.r-project.org/package=factoextra>
- Pahlow, G., Weissbach, F. (1999), New aspects of evaluation and application of silage additives. *Landbauforschung Voelkenrode SH* 206, 141–158.
- Perotti, E., Huguenin-Elie, O., Meisser, M., Dubois, S., Probo, M., Mariotte, P. (2020). Climatic, soil, and vegetation drivers of forage yield and quality differ across the first three growth cycles of intensively managed permanent grasslands. *European Journal of Agronomy* 122, 1–11.
- R Core Team (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- RS 910.91. Ordonnance du 7 décembre 1998 sur la terminologie agricole et la reconnaissance des formes d'exploitation (Ordonnance sur la terminologie agricole OTerm)
- Van Soest, P. J., Robertson, J. B., Lewis, B. A. (1991) Methods of dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science* 74, 3583–3597.
- Weissbach, F., Honig, H. (1992) Ein neuer Schlüssel zur Beurteilung der Gärqualität von Silagen auf Basis der chemischen Analyse. 104. VDLUFA-Kongress Göttingen. *VDLUFA-Schriftenreihe* 35, 489–494.
- Wyss, U., Dettling, T., Reidy, B. (2016) Ensilages d'herbe de montagne: des exploitations sous la loupe. *Recherche Agronomique Suisse* 7 (4), 188–195.