

Méthode non destructive d'estimation de la biomasse de couverts végétaux

Lucie Büchi, Pauline Mouly, Camille Amossé, Cindy Bally, Marina Wendling et Raphaël Charles

Agroscope, Institut des sciences en production végétale IPV, 1260 Nyon, Suisse

Renseignements: Raphael Charles, e-mail: raphael.charles@agroscope.admin.ch



Couverts végétaux au début du mois de novembre. Au premier plan, une parcelle de phacélie; au second plan, un mélange de onze espèces dans lequel on reconnaît, en fleurs, du tournesol, de la moutarde blanche (petites fleurs jaunes) et de la féverole.

Introduction

L'utilisation de couverts végétaux dans la rotation est de plus en plus répandue. Les couverts remplissent plusieurs services importants, tels que la protection du sol contre l'érosion et le ruissellement, la diminution du lessivage des nutriments, l'apport de matière organique et de nutriments, l'amélioration de la structure du sol et la lutte contre les adventices (Thorup-Kristensen *et al.* 2003; Justes *et al.* 2013). L'efficacité des couverts à remplir ces fonctions dépend directement de la quantité de biomasse produite. Par exemple, une biomasse élevée permet de lutter plus efficacement contre les adventices (Charles *et al.* 2013). La biomasse permet aussi de déterminer la quantité d'éléments nutritifs prélevés par le couvert et mis à disposition pour la culture suivante. Il est donc intéressant de pouvoir la quantifier. Toutefois, son estimation par récolte manuelle d'une surface donnée est destructive, fastidieuse et peu pratique à réaliser en routine. L'utilisation de méthodes non destructives et faciles à mettre en œuvre est donc nécessaire. La plupart des méthodes existantes se basent sur une mise en relation de la biomasse du couvert avec sa hauteur et/ou sa densité spatiale (Mosimann 2001; Lati *et al.* 2011; Bumgarner *et al.* 2012; Foster *et al.* 2012; Muñoz *et al.* 2010; Jan-

noura *et al.* 2015). Ces méthodes partent de l'hypothèse que la densité spatiale x la hauteur donne une grandeur tridimensionnelle (de type volume) proportionnelle à la biomasse produite.

La densité spatiale du couvert est souvent estimée par le NDVI (*normalised difference vegetation index* ou indice de végétation par différence normalisé) ou le LAI (*leaf area index* ou indice de surface foliaire) (Foster *et al.* 2012; Muñoz *et al.* 2012; Jannoura *et al.* 2015). Toutefois, ces méthodes ne sont pas facilement utilisables dans la pratique. La couverture du sol par le couvert, c'est-à-dire la fraction de sol couvert par la projection verticale des plantes sur le sol, déterminable visuellement (Amossé *et al.* 2015) ou sur la base de photos, est par contre une mesure simple à utiliser (Lati *et al.* 2011; Bumgarner *et al.* 2012).

Dans cette étude, nous avons étudié vingt espèces pures différentes utilisées comme couvert végétal. Le but était de déterminer la biomasse d'un couvert en mesurant uniquement sa hauteur et la couverture du sol. Les relations obtenues ont ensuite été testées sur deux mélanges et quatre espèces pures cultivées la même année, ainsi que sur six espèces l'année suivante, afin de tester la robustesse des relations établies face aux fluctuations locales et interannuelles. Une application pratique de ces estimations dans le but d'évaluer la quantité de nutriments accumulée par le couvert est aussi proposée.

Matériel et méthode

Le principal essai utilisé pour cette étude a été mis en place en août 2013 à Agroscope Changins (46° 24' N, 06° 14' E, 430 m). Sur ce site, la température moyenne annuelle est de 10,2 °C et les précipitations se montent à 999 mm par année (moyennes 1981–2010). Le sol est composé d'environ 26% d'argile et 47% de limon.

Vingt espèces de couverts végétaux ainsi que deux mélanges, l'un de quatre espèces et l'autre de onze espèces (tabl. 1), ont été semés en parcelles de 10 m² avec un semoir expérimental au début du mois d'août, après une luzerne. Les couverts ont été irrigués deux fois avec 15 mm d'eau peu après le semis pour assurer

Tableau 1 | Pente et constante (ordonnée à l'origine) de la régression linéaire entre biomasse d'une part et le produit de la couverture du sol et de la hauteur d'autre part pour les vingt espèces de couverts végétaux étudiées, ainsi que pour la régression globale sur toutes les espèces. Les paramètres en gras sont significativement différents de zéro ($p < 0,05$), ceux en italique le sont marginalement ($0,05 < p < 0,1$). Equation de la régression: $B = \text{pente} \times C \times H + \text{constante}$ avec B: biomasse en kg/ha; C: couverture du sol en%; H: hauteur en cm.

	Pente	Constante	R ²
Modèles spécifiques			
Moutarde blanche (<i>Sinapis alba</i>)	0,37	836	0,95
Moutarde sarepta (<i>Brassica juncea</i>)	0,61	<i>686</i>	0,82
Navette (<i>Brassica rapa campestris</i>)	0,96	-23	0,90
Radis chinois (<i>Raphanus sativus longipinnatus</i>)	1,43	-264	0,89
Radis fourrager (<i>Raphanus sativus</i>)	0,90	385	0,90
Féverole (<i>Vicia faba</i>)	0,58	276	0,97
Lentille (<i>Lens culinaris</i>)	0,78	128	0,99
Pois fourrager (<i>Pisum sativum</i>)	0,83	78	0,96
Trèfle d'Alexandrie (<i>Trifolium alexandrinum</i>)	0,58	60	1,00
Vesce commune (<i>Vicia sativa</i>)	0,92	19	0,92
Avoine rude (<i>Avena strigosa</i>)	0,74	10	0,97
Moha (<i>Setaria italica</i>)	0,56	28	0,95
Sorgho (<i>Sorghum sudanense</i>)	0,52	-48	0,90
Tournesol (<i>Helianthus annuus</i>)	0,65	-348	0,84
Niger (<i>Guizotia abyssinica</i>)	0,58	149	0,95
Phacélie (<i>Phacelia tanacetifolia</i>)	0,69	344	0,88
Sarrasin (<i>Fagopyrum esculentum</i>)	0,61	-292	0,69
Lin (<i>Linum usitatissimum</i>)	0,57	403	0,94
Chanvre (<i>Cannabis sativa</i>)	0,51	-251	0,85
Chia (<i>Salvia hispanica</i>)	0,47	101	0,98
Modèle global	0,53	433	0,75

une implantation optimale. Aucune fertilisation n'a été appliquée. L'essai était disposé en blocs randomisés avec trois répétitions.

Quatre prélèvements de biomasse ont été effectués pendant la période de forte croissance des couverts (23, 28, 35 et 48 jours après semis). Pour chaque espèce, la biomasse a été coupée manuellement au ras du sol dans un quadrat de 0,5 m x 0,5 m, puis séchée à 55 °C pendant 72 heures, pour déterminer le rendement en matière sèche. La teneur en éléments nutritifs (N, P et K total) a aussi été déterminée. La couverture du sol dans chaque quadrat ainsi que la hauteur du couvert ont été mesurées au moment du prélèvement. La couverture du sol a été

Résumé ■ Cette étude présente une méthode non destructive d'estimation de la biomasse de couverts végétaux basée sur l'évaluation au champ de la couverture du sol et de la hauteur du couvert. La détermination de la biomasse est utile pour quantifier les services attendus lors de l'utilisation de couverts, tels que la compétition contre les adventices, la prévention de l'érosion et du lessivage des nitrates, l'apport de nutriments et de matière organique. Des modèles linéaires ajustés sur les données d'un essai comprenant vingt espèces différentes de couverts végétaux montrent que le produit de la couverture et de la hauteur est un bon prédicteur de la biomasse produite. De plus, l'utilisation d'un modèle global, ajusté sur l'ensemble des espèces étudiées, a permis de prédire correctement la biomasse produite dans un autre essai conduit l'année suivante dans des conditions culturales différentes. La méthode est donc suffisamment robuste pour être utilisée au champ, avec une précision d'estimation de la biomasse d'environ 20%. Elle permet aussi d'estimer la quantité de nutriments accumulés par les couverts et ainsi d'évaluer la quantité de nutriments potentiellement disponibles pour la culture suivante.

évaluée par une simple estimation visuelle ainsi qu'à partir d'une photo prise au centre du quadrat à environ 1 m au-dessus de la végétation. Les photos ont été analysées avec le logiciel Assess 2.0 (Lamari 2008), en utilisant l'option d'estimation automatique de la couverture du sol.

Une régression linéaire a été ajustée entre la biomasse sèche (en kg/ha) et le produit de la hauteur (en cm) et de la couverture du sol (en%) («indice de volume»), pour chaque espèce séparément (modèles spécifiques), ainsi que pour toutes les espèces ensemble (modèle global). Une régression entre la biomasse et la hauteur seule d'une part, et entre la biomasse et la couverture seule d'autre part, a aussi été ajustée sur l'ensemble des espèces. La couverture du sol issue de l'analyse des photos a été utilisée afin de garantir une appréciation objective de la couverture du sol. Une comparaison avec l'estimation visuelle a été faite pour avoir également une méthode plus simple d'évaluation de la couverture du sol.

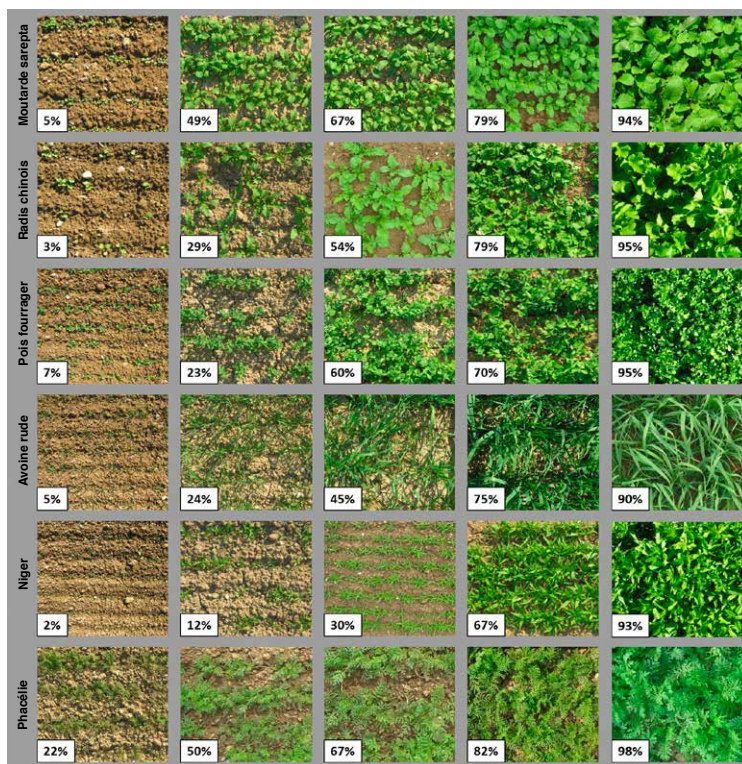


Figure 1 | Echelle de couverture du sol établie sur la base de photos prises lors de cette étude pour les six espèces testées pendant les deux années.

Le modèle global a ensuite été testé sur les deux mélanges semés dans le même essai. Les modèles spécifiques et le modèle global ont également été testés sur quatre espèces semées dans un autre essai contigu la même année, ainsi que sur six espèces semées dans un essai l'année suivante à Changins.

Le pouvoir de prédiction des modèles a été évalué i) par le biais du coefficient de corrélation de Pearson entre valeurs mesurées et prédites ii) par la différence absolue entre valeurs mesurées et prédites et iii) par la différence relative entre ces valeurs (différence absolue divisée par la valeur mesurée).

Résultats et discussion

Couverture du sol

L'estimation visuelle de la couverture du sol est généralement bien corrélée à celle obtenue sur la base des photos (coefficient de corrélation entre estimations visuelles et photos $\rho=0,94$) et peut donc aussi être utilisée au champ. De plus, l'utilisation d'échelle de couverture du sol (fig. 1) pour entraîner préalablement les observateurs permet d'améliorer la précision des estimations visuelles (Gallegos Torell et Glimskär 2009).

Définition des modèles

Sur l'ensemble des espèces (modèle global), la régression entre la biomasse et l'indice de volume (produit de la couverture et de la hauteur des couverts) est positive et significative, avec un R^2 égal à 75% (fig. 2 et tabl. 1). Ce résultat est meilleur que pour les régressions avec la hauteur seule ($R^2 = 68\%$) ou la couverture seule ($R^2 = 49\%$). Cela montre que la prise en compte de ces deux aspects simultanément permet une meilleure estimation de la biomasse du couvert. Même si l'ajustement linéaire donne de bons résultats, les observations indiquent une légère non linéarité pour les valeurs faibles.

Concernant les régressions par espèce, les R^2 obtenus sont généralement élevés (tabl. 1), de 82% (moutarde sarepta) à 99,6% (trèfle d'Alexandrie; fig. 3), sauf pour le sarrasin ($R^2 = 69\%$). Pour le sarrasin, le mauvais ajustement de la régression est dû principalement aux trois observations présentant les biomasses les plus élevées (dernière date de prélèvement), pour lesquelles l'indice de volume n'est pas assez élevé par rapport aux autres observations (fig. 3). Cela vient probablement du fait que le sarrasin est une plante couvrant rapidement le sol mais ayant tendance à verser avec le temps. Ainsi, la biomasse du couvert continue à augmenter sans que la hauteur ne change beaucoup.

Les pentes des régressions varient beaucoup d'une espèce à l'autre (de 0,37 pour la moutarde blanche à 1,43 pour le radis chinois; tabl. 1). Cela indique que la relation entre la biomasse et l'indice de volume est spécifique à chaque espèce. La pente de la régression est le coefficient faisant le lien entre indice de volume et biomasse. Elle peut donc être assimilée à une estimation de la densité de la végétation dans l'espace tridimensionnel. A relever, les espèces présentant des pentes élevées (radis chinois, navette, vesce, etc.) sont plutôt petites et ramassées, tandis que les espèces présentant des pentes faibles (moutarde blanche, chanvre, sorgho, etc.) ont tendance à former de hautes tiges.

Validation des modèles

L'utilisation du modèle global pour prédire la biomasse des deux mélanges montre globalement de bons résultats (coefficient de corrélation entre valeurs mesurées et prédites $\rho=0,79$; fig. 4), avec en moyenne une différence absolue positive de 718 kg/ha entre les moyennes des biomasses mesurées et prédites (0,24 en différence relative). Les trois valeurs de biomasse mesurée les plus élevées sont particulièrement mal prédites et contribuent ainsi fortement à l'augmentation de cette différence. Sans ces trois valeurs, la différence absolue moyenne entre biomasse mesurée et prédite tombe à 436 kg/ha (0,21 en différence relative). Ici aussi, les valeurs mal prédites sont des valeurs élevées de biomasse mesurées, pour lesquelles l'utilisation de l'indice de volume calculé engendre une sous-estimation de la biomasse. Cette sous-estimation est probablement due à l'architecture complexe des mélanges qui permet une croissance de biomasse sans augmentation de la hauteur ou de la couverture du sol, par exemple par le biais de la croissance des espèces des strates inférieures.

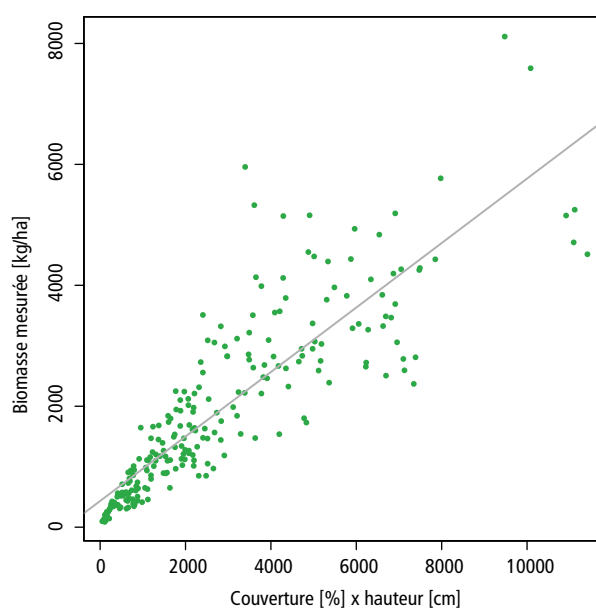


Figure 2 | Relation entre la biomasse d'une part et le produit de la couverture du sol et de la hauteur d'autre part toutes espèces confondues. La ligne grise représente la régression linéaire entre ces deux valeurs (voir tabl. 1 pour l'équation).

L'utilisation des modèles (tabl. 1) pour prédire la biomasse produite a aussi été testée sur quatre espèces semées dans un essai contigu la même année. La biomasse a été mesurée à 30 et 49 jours après semis, en même temps que la hauteur et la couverture de la végétation. La hauteur et la couverture ont été estimées globalement sur l'ensemble de la parcelle de 10 m² et non dans un quadrat de 0,25 m² comme précédemment, car cela est plus facilement praticable au champ. Pour la même raison, la couverture du sol a été estimée visuellement et non sur la base

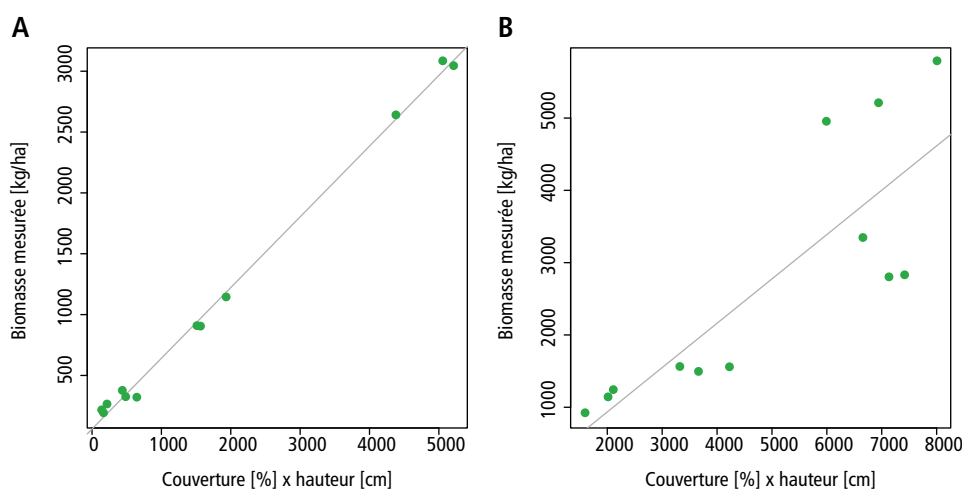


Figure 3 | Relation entre la biomasse et le produit de la couverture du sol x la hauteur, pour le trèfle d'Alexandrie (A) et le sarrasin (B). La ligne grise représente la régression linéaire entre ces deux valeurs (cf. tabl. 1 pour les équations).

de photos. Les coefficients de corrélation entre valeurs mesurées et prédites sont tous très élevés et significatifs (tabl. 2). Pour les quatre espèces, les modèles spécifiques donnent des estimations de biomasse plus proches des biomasses observées que le modèle global (fig. 5 et tabl. 2), avec une différence relative proche de 20% (tabl. 2).

Les modèles calibrés dans cette étude ont été testés également sur un essai mené l'année suivante. Six espèces ont été semées en 2014 dans un essai visant à tester l'effet de la densité de semis sur la croissance des couverts. La biomasse, la hauteur et la couverture (estimation visuelle) du couvert ont été mesurées sur l'ensemble de la parcelle 69 jours après semis. Toutes les mesures ont donc été faites à la même date, et relativement tardivement par rapport à l'essai ayant servi pour le calibrage des modèles (dernier prélèvement 48 jours après le semis en 2013).

Ici aussi, les coefficients de corrélation entre valeurs mesurées et prédites sont tous positifs et significatifs, sauf celui du pois fourrager (tabl. 2). Comme le pois couvre rapidement le sol sans prendre beaucoup de hauteur, les mesures tardives de couverture du sol ne permettent probablement pas de capturer correctement les variations de biomasse. Pour la plupart des espèces, c'est le modèle global qui estime le mieux la biomasse mesurée (fig. 6 et tabl. 2), tandis que les modèles spécifiques tendent ici à la surestimer (fig. 6). Ceci peut être dû à plusieurs facteurs. Etant donné que 2014 a été une année moins favorable à la croissance des couverts que 2013, cela a peut-être induit des biomasses plus faibles pour une même couverture et hauteur. La différence

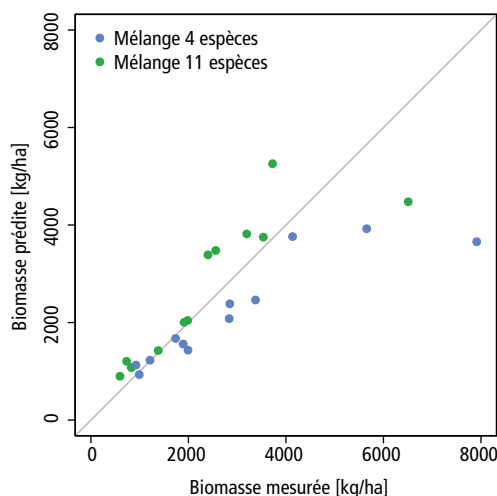


Figure 4 | Relation entre la biomasse prédite par le modèle global et la biomasse mesurée pour deux mélanges plurispécifiques (mélange à quatre espèces en bleu et à onze espèces en vert). Les points sur la ligne grise correspondent à des parcelles pour lesquelles le modèle prédit parfaitement la biomasse mesurée.

dans les dates de prélèvements de la biomasse entre les deux essais (beaucoup plus tardives en 2014) joue peut-être aussi un rôle, puisque la biomasse tend à diminuer pour certaines espèces après le pic de croissance, sans forcément induire une diminution de la couverture ou de la hauteur. Ces résultats montrent que l'utilisation des modèles spécifiques donne de bons résultats dans le cas de couverts relativement «jeunes» et poussant dans de bonnes conditions. Au contraire, l'utilisation du

Tableau 2 | Différences absolue et relative entre valeurs mesurées et prédites pour les modèles spécifiques et pour le modèle global, pour quatre espèces cultivées la même année dans un essai différent (n=6) et pour six espèces cultivées l'année suivante (n=40); coefficient de corrélation de Pearson entre valeurs mesurées et prédites (mêmes coefficients que ce soit avec les modèles spécifiques ou global). Tous les coefficients de corrélation sont significativement différents de 0 (p<0,05), sauf celui du pois en 2014.

	Modèles spécifiques		Modèle global		Coefficient de corrélation
	Différence absolue	Différence relative	Différence absolue	Différence relative	
2013					
Moutarde sarepta	798	0,21	1237	0,29	0,94
Pois fourrager	454	0,20	526	0,21	0,87
Avoine rude	584	0,24	819	0,25	0,98
Phacélie	359	0,13	651	0,17	0,98
2014					
Moutarde sarepta	586	0,29	384	0,19	0,71
Radis chinois	443	0,25	558	0,29	0,49
Pois fourrager	919	0,48	384	0,21	-0,09
Avoine rude	898	0,39	467	0,22	0,84
Niger	554	0,21	554	0,22	0,65
Phacélie	653	0,26	374	0,14	0,81

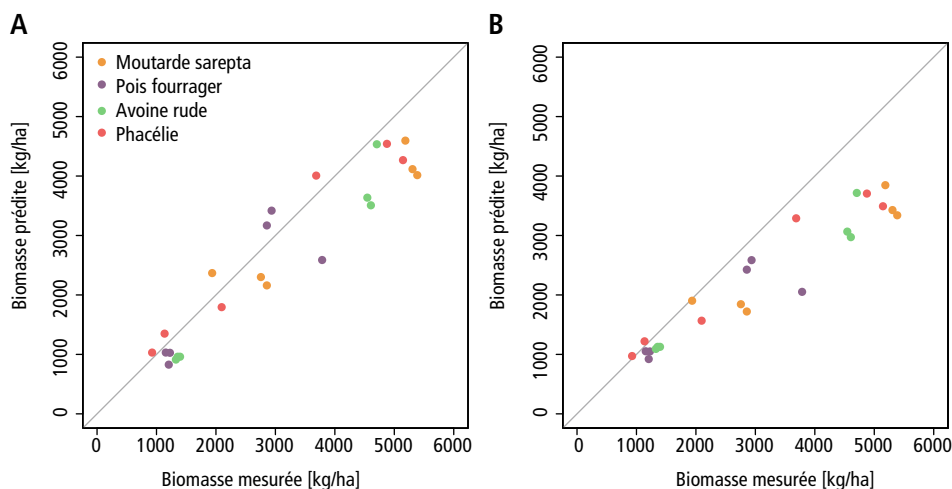


Figure 5 | Biomasse mesurée et biomasse prédite par les modèles spécifiques (A) et par le modèle global (B), pour quatre espèces étudiées dans un autre essai conduit la même année.

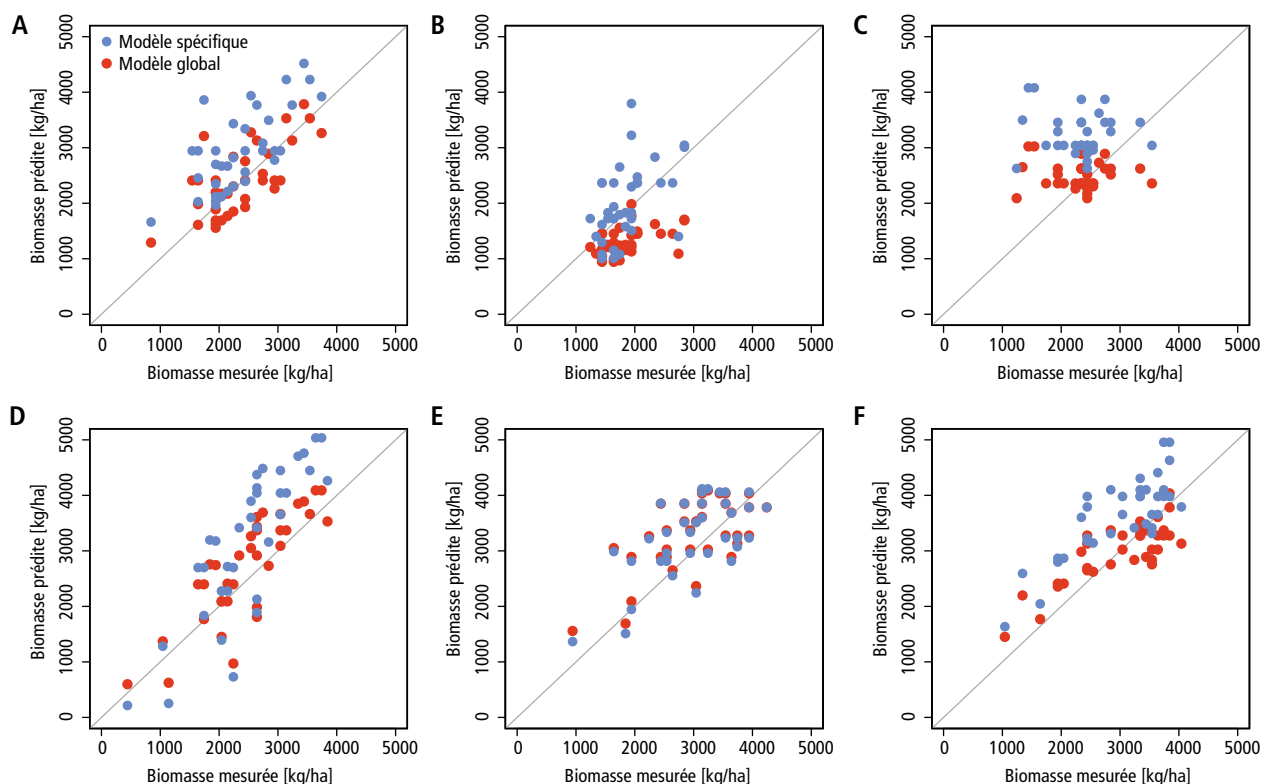


Figure 6 | Biomasse mesurée et biomasse prédite par les modèles spécifiques et par le modèle global pour six espèces cultivées l'année après l'essai ayant servi au calibrage des modèles. A: moutarde sarepta; B: radis chinois; C: pois fourrager; D: avoine rude; E: niger; F: phacélie.

modèle ajusté sur l'ensemble des espèces est plus robuste face aux différences de conditions interannuelles. Une exception apparaît toutefois pour le radis chinois, dont les biomasses sont mieux prédites par le modèle spécifique que par le global les deux années (fig. 6; tabl. 2). Ceci est probablement dû à l'architecture très particulière du radis chinois qui, avec une très grosse

racine pivotante, sortant en partie du sol et contribuant donc à la biomasse aérienne, est mieux prise en compte par un modèle spécifique.

Utilisation pratique de la méthode

L'estimation de la biomasse des couverts permet d'estimer les services que le couvert peut offrir, que ce soit pour

Tableau 3 | Teneurs en nutriments et rapport C/N mesurés pour les vingt espèces lors du dernier prélèvement de biomasse utilisé dans cette étude (48 jours après semis) et lors d'un prélèvement ultérieur (85 jours après semis).

	N [g/kg]		P [g/kg]		K [g/kg]		C/N	
	48 jas	85 jas	48 jas	85 jas	48 jas	85 jas	48 jas	85 jas
Moutarde blanche	19	13	2,7	2,2	30	21	24	35
Moutarde sarepta	21	17	3,1	2,8	38	34	20	27
Navette	23	20	4,3	5,4	45	38	18	21
Radis chinois	26	22	4,0	5,3	46	43	16	19
Radis fourrager	22	16	3,9	3,9	45	39	19	28
Féverole	40	22	3,8	3,5	25	25	11	21
Lentille	42	35	5,0	5,1	30	31	11	14
Pois fourrager	44	36	4,9	5,2	30	32	9	11
Trèfle d'Alexandrie	37	29	3,1	3,3	29	25	11	16
Vesce commune	45	36	4,1	4,0	29	33	10	12
Avoine rude	25	19	3,9	3,4	41	33	18	24
Moha	33	20	3,3	2,5	45	36	13	22
Sorgho	27	18	3,7	3,6	33	27	17	26
Tournesol	22	15	3,1	2,9	37	25	20	30
Niger	30	17	4,0	3,8	50	47	13	25
Phacélie	31	21	5,4	4,8	53	42	13	21
Sarrasin	23	16	3,2	2,7	28	11	19	29
Lin	34	21	4,3	3,5	30	25	14	22
Chanvre	24	22	3,5	4,9	22	12	18	21
Chia	33	19	4,3	4,6	42	36	13	24

concurrer les adventices ou protéger le sol contre l'érosion, etc. Par exemple, une biomasse de 35 dt/ha est nécessaire pour un bon contrôle des adventices (Charles *et al.* 2013).

Multipliée par la concentration en nutriments, cette estimation de la biomasse permet aussi d'évaluer la quantité de nutriments et de matière organique qui seront restitués au sol. La concentration en nutriments varie fortement avec l'âge de la végétation et les conditions environnementales. Les concentrations en N, P et K des couverts étudiés ici sont données dans le tableau 3 pour deux dates de prélèvements: lors du dernier prélèvement utilisé dans cette étude (48 jours après semis) et lors d'un prélèvement ultérieur, lorsque la biomasse de certaines

espèces était déjà sénescence (85 jours après semis). Le rapport C/N du couvert lors de sa destruction permet d'estimer la vitesse à laquelle il sera dégradé et la quantité libérée d'azote et d'autres nutriments. Typiquement, de 10% à 50% du N absorbé par les légumineuses est libéré lors de leur dégradation, contre de -10% à +30% pour les crucifères et -20% à +10% pour les graminées (Justes *et al.* 2013).

Conclusions et perspectives

- Cette étude montre qu'il est possible d'évaluer la biomasse d'un couvert végétal à l'aide de deux mesures facilement mises en œuvre au champ: la hauteur du couvert et sa couverture du sol.
- Les modèles spécifiques à chaque espèce peuvent être utilisés pour estimer la biomasse produite au début et pendant la pleine croissance du couvert, lorsque les conditions de culture sont bonnes.
- L'utilisation du modèle global semble préférable dans des conditions de croissance peu favorables et en fin de cycle. Le calibrage des modèles ayant été fait dans un seul site, leur pouvoir de prédiction est susceptible de changer lors d'extrapolation à d'autres sites.
- La méthode présentée permet également d'obtenir, à deux dates distinctes, des estimations non destructives de la quantité de nutriments accumulés dans la biomasse et mis potentiellement à disposition de la culture suivante. ■

Remerciements

Cette étude a été partiellement financée par le Fonds national suisse de la recherche scientifique dans le cadre du Programme national de recherche PNR68 «Utilisation durable de la ressource sol», subsidence 406840-143063.

Riassunto

Metodo non distruttivo di valutazione della biomassa delle colture di copertura

Il presente studio presenta un metodo non distruttivo di valutazione della biomassa delle colture di copertura, basato sulla valutazione in campo della copertura del suolo e dell'altezza delle colture. La determinazione della biomassa è utile per quantificare i servizi attesi al momento dell'utilizzo delle colture di copertura, quali la lotta contro le malerbe, la prevenzione dell'erosione e della lisciviazione dei nitrati, l'apporto di nutrienti e di materia organica. Alcuni modelli lineari adattati ai dati di un esperimento comprendente venti specie diverse di colture di copertura mostrano che la copertura e l'altezza si rivelano validi dati per prevedere la biomassa prodotta. Inoltre, l'uso di un modello globale, adattato all'insieme delle specie studiate, ha consentito di predire correttamente la biomassa prodotta nell'ambito di un altro esperimento condotto l'anno seguente in presenza di condizioni culturali differenti. Il metodo è pertanto sufficientemente valido per essere utilizzato in campo, con una precisione nella valutazione della biomassa pari ad approssimativamente il 20 per cento. Permette altresì di stimare la quantità di nutrienti accumulati dalle colture di copertura e di valutare così la quantità di nutrienti potenzialmente disponibili per la coltura che seguirà.

Summary

Non-destructive method for estimating cover-crop biomass

This study presents a non-destructive method for estimating cover-crop biomass, based on field estimation of soil cover and cover height. The estimation of biomass allows to quantify expected services offered by cover crops, such as competition against weed, erosion and leaching reduction, input of nutrients and organic matter. Linear models were adjusted to the data of a field screening of 20 cover crop species. The results show that the product of soil cover and height is a good predictor of cover-crop biomass. In addition, the use of a global model, adjusted to all species together, allows to predict the biomass produced in the context of another trial set up the year after, with different cropping conditions. The developed method is thus sufficiently robust to be used on field data, with a precision in biomass estimation of approx. 20%. It also allows to estimate nutrient uptake by cover crops and assess the quantity of nutrients made available for the following crop.

Key words: cover crop, soil cover, crop height, biomass, nutrients.

Bibliographie

- Amossé C., Dugon J., Chassot A., Courtois N., Etter J.-D., Fietier A., Grünig K., Henggartner W., Ramseier H., Rossier N., Sturny W., Wittwer R., Zimmermann A., Jeangros B. & Charles R., 2015. Comportements de différents couverts végétaux dans un réseau d'essais on farm. *Recherche Agronomique Suisse* 6 (11–12), 524–533.
- Bumgarner N. R., Miller W. S. & Kleinhenz M. D., 2012. Digital image analysis to supplement direct measures of lettuce biomass. *HortTechnology* 22, 547–555.
- Charles R., Wirth J., Büchi L., Sarthou J.-P. & Justes E., 2013. Couverts végétaux et allélopathie: Où en est la recherche ? *Techniques Culturelles Simplifiées* 71, 24–25.
- Foster A. J., Kakani V. G., Ge J. & Mosali J., 2012. Predicting biomass yield in bioenergy crop production systems using canopy NDVI. Proceedings from Sun Grant National Conference: Science for Biomass Feedstock Production and Utilization, New Orleans, LA. Retrieved from www.sungrant.tennessee.edu/NatConference/
- Gallegos Torell A. & Glimskär A., 2009. Computer-aided calibration for visual estimation of vegetation cover. *Journal of Vegetation Science* 20, 973–983.
- Jannoura R., Brinkmann K., Uteau D., Bruns C. & Joergensen R. G., 2015. Monitoring of crop biomass using true colour aerial photographs taken from a remote controlled hexacopter. *Biosystems Engineering* 129, 341–351.
- Justes E., Beaudoin N., Bertuzzi P., Charles R., Constantin J., Dürr C., Hermon C., Joannon A., Le Bas C., Mary B., Mignolet C., Montfort F., Ruiz L., Sarthou J.P., Souchère V., Tournebise J., Réchauchère O., Savini I., Barbier M. & Leiser H., 2013. Les cultures intermédiaires pour une production agricole durable. Editions Quae, 105 p.
- Lamari L. 2008. Assess 2.0. Image Analysis Software for Plant Disease Quantification. The American Phytopathological Society. ISBN 978-0-89054-369-6
- Lati R. N., Filin S. & Eizenberg H., 2011. Robust methods for measurement of leaf cover area and biomass from image data. *Weed Science* 59, 276–284.
- Mosimann E., 2001. Croissance des herbages. Méthodes de mesure et applications pratiques. *Revue suisse d'Agriculture* 33, 163–167.
- Muñoz J. D., Finley A. O., Gehl R. & Kravchenko S., 2010. Nonlinear hierarchical models for predicting cover crop biomass using normalized difference vegetation index. *Remote Sensing of Environment* 114, 2833–2840.
- Thorup-Kristensen K., Magid J. & Jensen L. S., 2003. Catch crops and green manures as biological tools in nitrogen management in temperate zones. *Advances in Agronomy* 79, 227–302.