



ph. M. El Jarroudi

Images hémisphériques et leur analyse, pour prévoir le rendement du blé d'hiver

Comment la phase de décroissance de la surface verte de la plante nous renseigne-t-elle sur le rendement final ?

Louis Kouadio*, B. Djaby*, Frédéric Giraud**, P. Delfosse***, B. Tychon* et M. El Jarroudi*

La chute de surface verte des céréales causée par les stress abiotiques et biotiques, notamment les maladies du feuillage, est très néfaste car elle occasionne de fortes pertes de rendement. Deux instituts de recherche [l'Université de Liège (ULg) et le Centre de recherche public Gabriel-Lippmann (CRP-GL)] se sont associés pour déterminer le rendement final en grains sur la base de la cinétique de dégradation de la surface verte du blé d'hiver au Grand-Duché de Luxembourg (GDL)⁽¹⁾. Une bonne connaissance de l'évolution de la dégradation de la surface verte en fonction du complexe parasitaire et du nombre de traitements fongicides appliqués est indispensable pour envisager une stratégie de lutte efficace et compatible avec un développement durable.

* Université de Liège, Département de sciences et gestion de l'environnement, 185, avenue de Longwy, B-6700 Arlon, Belgique. Correspondance auteur : Tél : +32 63 230 907.

Fax : +32 63 230 800. E-mail : al.kouadio@doct.ulg.ac.be

** Biorizon/Staphyt, Rue François-Magendie, Bordeaux Montesquieu 33650 Martillac.

*** Centre de recherche public Gabriel-Lippmann, Département environnement et agro-biotechnologies (EVA), 41, rue du Brill, L-4422 Belvaux, Luxembourg.

(1) C'est la culture la plus importante au GDL : 11 947 ha de blé d'hiver contre 10 400 ha de prairie en 2006.

Dans le contexte actuel, l'estimation précoce de la production agricole aux échelles nationale, régionale et mondiale est plus que jamais au cœur d'enjeux économiques, géostratégiques et humanitaires. Cependant, le développement de modèles opérationnels pour la prévision des rendements bute sur l'absence de prise en compte de la diminution de la surface verte des plantes cultivées.

Or, la connaissance et la modélisation de l'évolution de cette surface foliaire active sont très importants pour évaluer l'activité photosynthétique de la plante, car c'est de cette activité que dépend essentiellement la production de biomasse donc le rendement.

Difficultés rencontrées par les « modélisateurs »

Prise en compte de la sénescence de la surface verte dans les systèmes opérationnels classiques

La sénescence des feuilles constitue une phase normale du cycle de développement des plantes. Au cours de cette phase, s'installent des processus de dégénérescence irréversibles des structures et des fonctions cellulaires qui conduisent à une détérioration des tissus et



ph. M. El Jarroudi

Suivi visuel de la surface verte, fortement corrélée au futur rendement.

organes, et finalement à la mort de ceux-ci voire de l'organisme (Thomas & Stoddart, 1980).

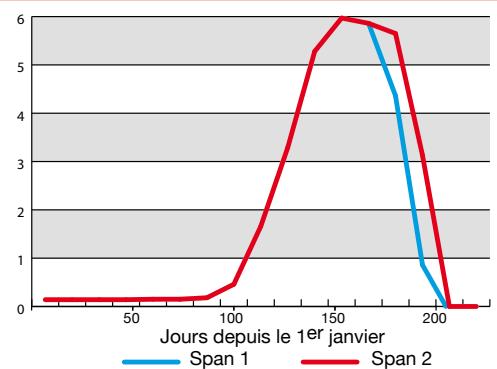
Chez les plantes annuelles, la sénescence peut se développer en l'absence de toute condition extérieure défavorable, mais le froid, la sécheresse, l'ombrage, l'élimination de certains organes de la plante ou la présence de pathogènes peuvent l'induire et l'accélérer.

Par exemple, sur le blé, la septoriose, responsable de pertes pouvant atteindre 40 % du rendement, agit sur les tissus de l'hôte en détruisant les cellules, soit lorsque le mycélium pénètre dans celles-ci, soit par l'intermédiaire d'enzymes pectolytiques et cellulolytiques et sans doute de toxines. Ces cellules perdent alors toute capacité à photosynthétiser ou à transpirer (Shtienberg, 1992).

Figure 1 - Évolution de la surface foliaire totale (LAI) du blé d'hiver simulée par WOFOST.

SPAN1= 27,3 jours et SPAN2= 34,3 jours. Les deux courbes présentent une croissance similaire jusqu'au maximum de la valeur du LAI.

La phase de décroissance débute plus vite et atteint plus rapidement sa fin dans le cas d'un « SPAN » (= durée de vie de la feuille verte) moins élevé (courbe bleue) que dans le cas d'un « SPAN » plus élevé (courbe rouge).



D'où l'importance fondamentale de l'étude de l'évolution de la surface verte.

À l'échelle des parcelles, il ressort qu'un ralentissement de la phase de sénescence des dernières feuilles émergées chez le blé d'hiver influencerait positivement le rendement final en grains (Gooding *et al.*, 2000). Dans le modèle développé par ces auteurs, la phase de sénescence est essentiellement caractérisée par le paramètre « *m* » définissant le temps requis par la surface verte totale pour décroître jusqu'à 37 % de sa valeur maximale (Gooding *et al.*, 2000).

Des trois dernières feuilles au couvert

Des études menées dans le cadre du système d'avertissement des maladies du blé d'hiver sur différents sites au Luxembourg par le CRP-GL et l'ULg montrent de très bonnes corrélations entre ce paramètre « *m* » et le rendement final en grains (El Jarroudi *et al.*, 2010). Toutefois, la valorisation de telles conclusions dans des modèles opérationnels s'avère difficile à mettre en œuvre puisqu'ils ne prennent en compte que les trois dernières feuilles émergées.

Un suivi direct, régulier et à grande échelle (départementale ou régionale) du couvert végétal pourrait alors fournir les données nécessaires à l'élaboration d'un modèle décrivant au mieux la phase de décroissance de la surface verte au cours de la sénescence et relier certains de ses paramètres au rendement final.

Amélioration d'un système existant

Une première réponse à cette attente est d'utiliser des modèles agrométéorologiques existants. Par exemple, le B-CGMS, à travers le modèle WOFOST (WOrld FOod STudies, Diepen *et al.*, 1989), permet de prendre en compte la sénescence dans l'évolution de la surface foliaire totale (Leaf Area Index, LAI) au cours de la saison, à travers un paramètre : le « SPAN ». Celui-ci se définit comme étant la durée de vie de la feuille verte, et est exprimé en nombre de jours. Plus ce paramètre est grand (mais jusqu'à un optimum propre à chaque culture), plus le début de la phase de sénescence sera retardé (Figure 1).

En combinant une calibration de ce paramètre aux conditions de cultures locales et en intégrant de façon indirecte l'effet des maladies (exemple de la septoriose ou de la rouille brune) par la modélisation du processus de sénescence, il est possible d'estimer le rendement.

Une approche à l'échelle de la parcelle

Suivi de la cinétique de dégradation de la surface verte de la plante : le Luxembourg, un cadre d'étude idéal

Le Luxembourg présente des situations topoclimatiques contrastées entre l'Oesling (nord) et le Gutland (sud), et entre l'est et l'ouest,

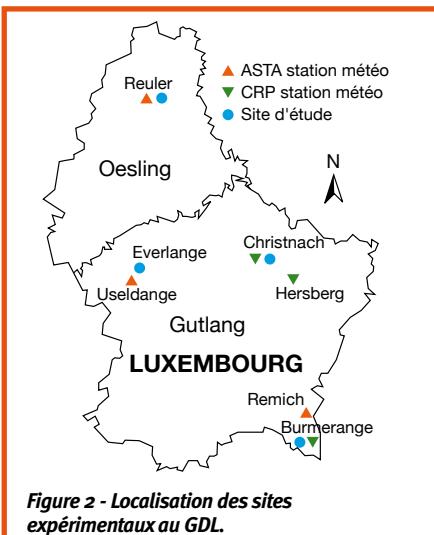
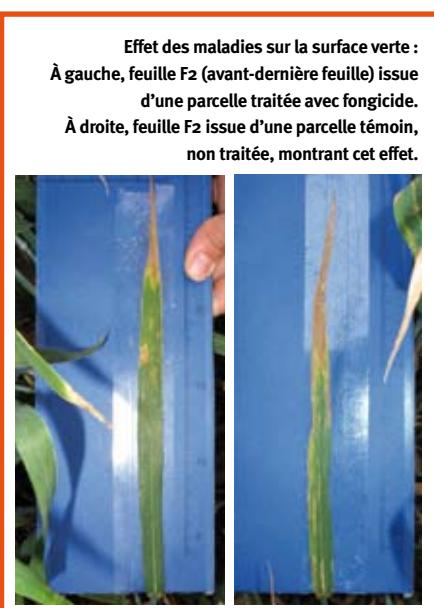


Figure 2 - Localisation des sites expérimentaux au GDL.

(Reuler au Nord, Éverlange et Christnach au Centre et Burmerange au Sud). Stations météorologiques suivies par l'ASTA (Administration des services techniques de l'agriculture) et le CRP (Centre de recherche public Gabriel Lippmann). Chaque site d'observation se trouve à proximité d'une telle station.

et ce sur un territoire de relative petite taille (2 586 km²) (El Jarroudi *et al.*, 2009).

Quatre sites sont observés durant la saison de culture 2008-2009 : le site de Burmerange (District : Grevenmacher), les sites de Christnach et d'Everlange (District : Luxembourg), et le site de Reuler (District : Diekirch). Ils ont été choisis selon les caractéristiques climatiques et la disponibilité des données météorologiques horaires à proximité de ceux-ci (Figure 2). De plus, sur chaque site, différentes applications de fongicides (mélange de strobilurine et triazole) sont effectuées, avec 4 répétitions (parcelles expérimentales de 10 m² chacune), en fonction de stades phénologiques déterminés. Ce réseau de parcelles d'essai permet d'observer diverses variations de niveaux d'infection et donc l'évolution de la surface verte dans des conditions relativement contrastées.



Photos M. El Jarroudi

Pour estimer la surface verte, des photographies hémisphériques

L'évolution de la surface foliaire au cours du temps peut être suivie aux champs à l'aide de l'équation modifiée de Gompertz (Gooding *et al.*, 2000) et de relevés de la surface verte. Parmi les méthodes de mesures indirectes, la photographie hémisphérique est de plus en plus utilisée.

Des photos particulières

La collecte des données a consisté en des prises d'images hémisphériques sur les 4 sites du Luxembourg, à des moments clés de la croissance du blé : entre les stades GS37 (approximativement stade fin montaison) et GS85 (stade développement pâteux de la graine). Celles-ci sont effectuées à l'aide d'un appareil photo numérique (type Canon Powershot A590, 8 megapixels), muni d'une lentille hémisphérique du type « fish-eye » dont le champ de vue est de 180 ° en zénith et de 360 ° en azimut (photos). L'échantillonnage directionnel est donc supérieur à celui d'autres capteurs tels le LAI 2000 (Licor® Biosciences).

Et leur analyse

Le logiciel utilisé pour estimer la surface foliaire à partir d'images hémisphériques dans le cadre de notre étude est le logiciel CAN-EYE (<https://www4.paca.inra.fr/can-eye>). Il permet de calculer notamment le « Plant Area Index » (PAI). Dans le cadre de notre étude, la variable d'intérêt dérivée des calculs est le « Green Area Index » (GAI), comprenant pour le blé l'ensemble des tissus de la plante photosynthétiquement actifs qui sont les feuilles, les tiges et les épis.

Vers une description affinée du déclin de la surface verte utile du blé d'hiver

Le calcul des paramètres *m* et *k* caractérisant la phase de décroissance du GAI est fait à travers deux fonctions d'ajustement : la fonction Gompertz modifiée et la fonction logistique modifiée (Gooding *et al.*, 2000).

La caractérisation de ces deux paramètres est établie sur la base des cumuls de températures (exprimés en degrés.jours). Les variables climatiques (températures minimale et maximale) sont issues des stations météorologiques proches des parcelles suivies.

Notons que les ajustements sont effectués sur les valeurs moyennes calculées de GAI des quatre répétitions pour chaque niveau de traitement (application de fongicide ou absence de traitement).

Gooding *et al.* (2000) montrent que la phase de décroissance de la surface verte des dernières feuilles émergées est mieux caractérisée par la fonction Gompertz modifiée que par la fonction logistique modifiée. Dans la caractérisation de

Tableau 1 - Proportions de variance expliquée (VAF) par les fonctions d'ajustement et valeurs des paramètres m et k pour les sites étudiés.

		Fonction Gompertz modifiée			Fonction logistique			GAI _{max} (m ² /m ²)	Rdt (ton.ha ⁻¹)
		VAF (%)	m _{gomp} (°C.jour)	k _{gomp} (-)	VAF (%)	m _{log} (°C.jour)	k _{log} (-)		
Burmerange	3T	94	694,5	-0,004	94	624,6	-0,0045	7,05	12,5
	2T	94	698,4	-0,0039	94	625,6	-0,0044	6,86	11,7
	Control	98	537,4	-0,0065	97	483,4	-0,0077	6,34	9,2
Christnach	3T	91	683,3	-0,0053	90	645,6	-0,0057	6,61	11,6
	2T	98	620,9	-0,0062	98	582,9	-0,0067	6,54	11,3
	Control	97	476,5	-0,0061	98	414,7	-0,0074	6,4	10,1
Everlange	3T	94	560,5	-0,0063	93	512,6	-0,0071	6,37	10,1
	2T	93	536,8	-0,007	91	492,2	-0,0079	6,47	9,6
	Control	96	483,2	-0,0054	97	411,6	-0,0067	6,29	8,3
Reuler	3T	96	763,2	-0,0034	97	597,7	-0,0048	7,17	11,8
	2T	94	759,7	-0,0031	96	584,6	-0,0043	7,09	11,9
	Control	88	686,3	-0,0028	92	479,3	-0,0045	7,06	9,9

Les ajustements sont effectués sur les valeurs moyennes calculées de GAI des répétitions pour chaque niveau de traitement. De même les valeurs de GAI_{max} et de rendement sont les valeurs moyennes déduites des répétitions à chaque niveau de traitement correspondant.

3T : Triple traitement fongicide ; 2T : double traitement fongicide ; Control : pas de traitement fongicide. VAF : Proportion de variance expliquée.

la décroissance de la surface verte utile de la plante, les deux fonctions décrivent tout aussi bien cette phase dans notre étude.

En effet, l'analyse des proportions de variance expliquée (VAF) par les fonctions d'ajustement montrent que celles-ci sont satisfaisantes (Tableau 1).

En moyenne, la VAF est de 94 % pour la fonction Gompertz modifiée et de 95 % pour la fonction logistique, avec des valeurs comprises entre 88 et 98 %. De plus, l'ANOVA réalisée entre les proportions de variance expliquée par chacune des deux fonctions d'ajustements, montre que celles-ci ne sont pas significativement différentes ($P = 0,609$, non significatif au seuil $\alpha = 0,05$).

Une approche méthodologique dans une perspective de grande échelle

Élaboration de trois modèles

L'approche méthodologique élaborée pour établir les modèles d'estimation du rendement final en grain est reprise en figure 3.

Les modèles d'estimation sont élaborés par régression linéaire multiple en fonction du modèle d'ajustement utilisé, avec d'une part

les rendements observés comme variable à expliquer, et d'autre part comme variables explicatives les paramètres GAI_{max}, m_{gomp}, k_{gomp} dans le cas de la fonction Gompertz modifiée, et GAI_{max}, m_{log}, k_{log} dans le cas de la fonction logistique modifiée (Tableau 1).

GAI_{max} désigne la valeur maximale du GAI observé.

k_{gomp} (respectivement k_{log}) est le taux de sénescence dérivé de l'ajustement par la fonction Gompertz modifiée (respectivement la fonction logistique modifiée).

m_{gomp} (respectivement m_{log}) désigne le point d'infexion de la courbe ajustée par la fonction Gompertz modifiée (respectivement la fonction logistique) et correspond au temps (en degrés. jours) requis pour atteindre une valeur restante de GAI égale à 37 % (50 % dans le cas de la fonction logistique modifiée).

Un aspect important pris en compte dans l'élaboration des modèles est que les variables explicatives ne sont pas corrélées entre elles.

Trois modèles sont ainsi élaborés. Ce sont :

Modèle 1 : Rendement = f(m_{gomp}, k_{gomp}) ;

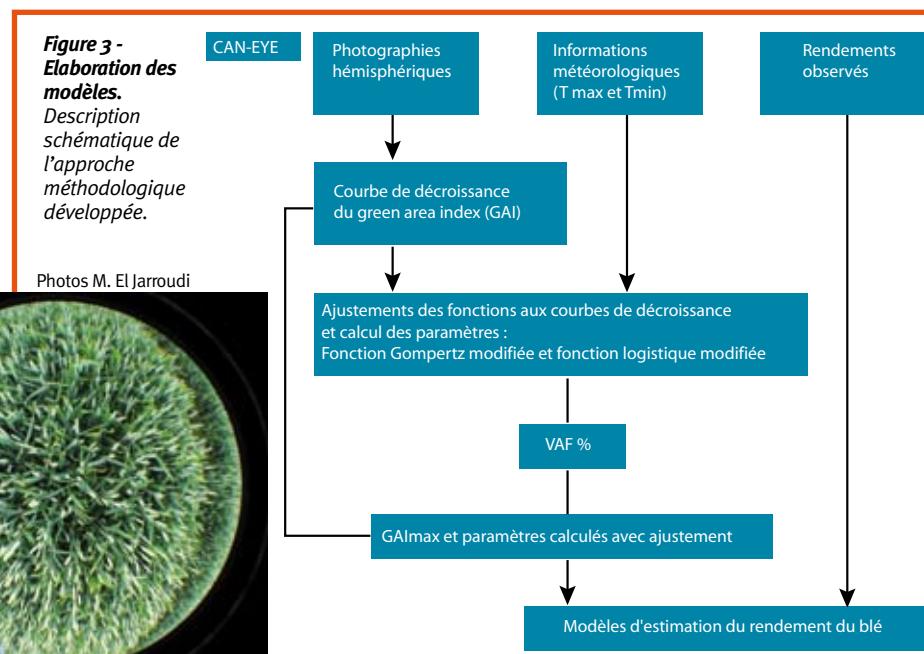
Modèle 2 : Rendement = f(GAI_{max}, m_{log}) ;

Modèle 3 : Rendement = f(m_{log}, k_{log}).

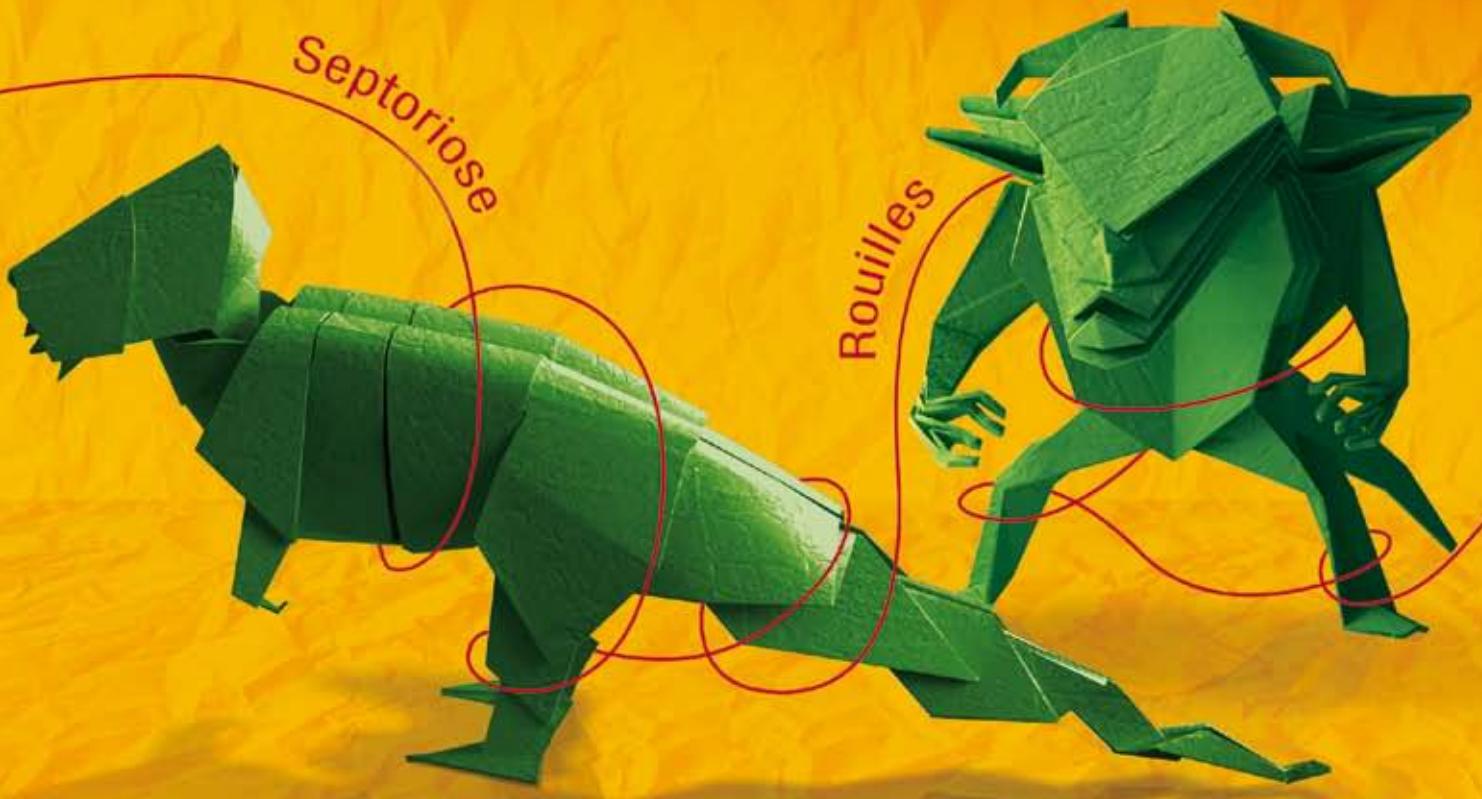
Leurs performances

Ces trois modèles présentent des performances satisfaisantes pour une estimation du rendement final.

Plus particulièrement, à partir de la valeur maximale du GAI et du paramètre m exprimant le temps requis pour atteindre 50 % de la surface verte restante (à partir de la valeur maximale), la variabilité des rendements observés est expliquée à 86 %, avec une erreur moyenne de 0,43 t/ha (modèle 2, Figure 4 p. 12).



Quelle est la meilleure solution triazole contre les monstrueuses maladies de la feuille ?



Osiris[®] Win

Le fongicide reconnu pour son efficacité sur septoriose et rouilles.

www.agro.bASF.fr

Cultivons l'innovation autrement

BASF

The Chemical Company

DUFRESNECORRIGANSCARLETT © Marque déposée BASF. Osiris® Win. Autorisation de vente : n°2090092 . Composition : 37,5 g/L d'époxiconazole + 27,5 g/L de metconazole. Classement : N - Xn - R40 - R43 -R51/53. Port de gants et de vêtements de protection pendant toutes les opérations de mélange chargement et de traitement. Dangereux. Respecter les précautions d'emploi, lire attentivement l'étiquette avant toute utilisation. Novembre 2011. Crédits photo : Studio Alban Perret, Getty Images.

**PRODUITS POUR LES PROFESSIONNELS : UTILISEZ LES PRODUITS PHYTOPHARMACEUTIQUES AVEC PRÉCAUTION.
AVANT TOUTE UTILISATION, LISEZ L'ETIQUETTE ET LES INFORMATIONS CONCERNANT LE PRODUIT.**

Bibliographie

• La bibliographie de cet article (12 références) est disponible auprès de ses auteurs.

La même performance peut être observée pour les deux autres modèles, les erreurs moyennes étant de 0,46 et 0,53 t/ha (Figure 4).

L'utilisation des valeurs de GAI obtenues par photographies hémisphériques permet un suivi de la couverture végétale dans son ensemble au niveau parcellaire. En ayant suivi différentes variétés de blé en des lieux variés du point de vue pédologique et même météorologique, on a pu estimer avec une marge d'erreur convenable (les erreurs moyennes variant entre 0,43 et 0,56 t/ha) le rendement final en grains.

Vers l'application avec des informations satellites

De par la simplicité de l'approche utilisée et du nombre réduit de variables explicatives du rendement final, ces résultats constituent un premier pas dans l'estimation du rendement du blé à de plus grandes échelles.

La seconde étape dans notre approche est désormais de la valider sur une plus large zone en

utilisant des sets de données plus importants. En effet, les avancées scientifiques et technologiques actuelles en matière de télédétection montrent qu'il est possible d'extraire des variables agronomiques telles que l'indice de surface foliaire, le recouvrement du sol ou encore la fraction du rayonnement photosynthétiquement actif, des images multi-spectrales (Bégué, 2002 ; Doraiswamy *et al.*, 2004 ; Liang, 2004).

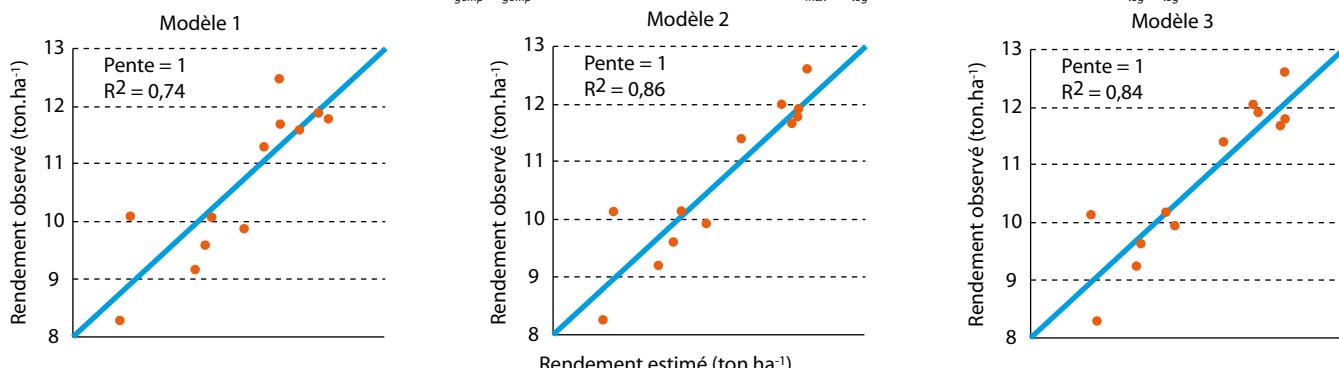
Le GAI pouvant être également dérivé des images satellitaires (Duveiller *et al.*, 2009), un suivi de sa cinétique de décroissance et l'application de notre approche nous permettrait d'évaluer le rendement final à l'échelle de plus grandes

zones (département, région, etc.). Ceci à terme servirait à une mise en application dans les systèmes opérationnels de prévision de rendements du blé. Des essais sont déjà en cours au sein du département Sciences et gestion de l'environnement de l'ULg pour la validation de cette nouvelle approche.

Remerciements : Cette étude a lieu dans le cadre du projet de thèse de doctorat de L. Kouadio, financé par la Présidence de la République de Côte d'Ivoire, et des projets MACRY et SENTINELLE financés par le Ministère de l'Agriculture, de la Viticulture et du Développement Rural-Administration des Services Techniques de l'Agriculture (ASTA) du Grand-Duché

de Luxembourg. Nous remercions également toutes les personnes qui ont participé à la collecte des données sur le terrain, plus particulièrement : Farid Traoré, Michel Noël, Marco Beyer, Tiphaine Dubos et Friederike Pogoda. Un grand merci à Jürgen Junk, Laurent Pfister, et Jean-François Iffly pour les données météorologiques mises à notre disposition.

Figure 4 - Performances des modèles. Relation entre les rendements observés et les rendements estimés par les trois modèles.
Modèle 1 : Rendement = $f(m_{gomp}, k_{gomp})$; Modèle 2 : Rendement = $f(GAI_{max}, m_{log})$; Modèle 3 : Rendement = $f(m_{log}, k_{log})$.



Résumé

Le blé d'hiver est largement cultivé au Grand-Duché de Luxembourg. Une estimation précoce du rendement à l'échelle des régions à travers un système opérationnel serait un atout vu son importance économique.

Le développement actuel de modèles pour la prévision des rendements dans les systèmes opérationnels classiques ne traduit cependant pas véritablement la prise en compte de la diminution de la surface verte utile et de sa relation avec des processus biotiques et abiotiques incriminés en situation de production.

L'article présente une approche d'estimation du rendement final du blé d'hiver réalisée en 2009 à partir de la cinétique de dégradation de sa surface verte utile suite à l'analyse de photographies hémisphériques. Cette approche peut être facilement applicable à l'échelle des régions agricoles.

Les modèles issus de cette approche montrent que le rendement final en grains peut être es-

timé de manière intéressante : avec des coefficients de détermination (R^2) allant de 0,73 à 0,86 et des erreurs quadratiques moyennes (RMSE) variant de 0,43 à 0,56 t/ha. De par sa simplicité et le nombre réduit de variables explicatives du rendement final considérées, cette étude constitue un premier pas dans l'estimation du rendement du blé à échelle globale.

Des études sont en cours pour l'application d'une telle approche avec des profils de surface verte utile issus d'images satellites.

Mots-clés : blé, rendement, Green Area Index, sénescence, images hémisphériques

Summary

The prediction of cereal-crop yield is considered as a priority in most crop research programmes due to the relevance of food grain to feeding the world population. Today, a large number of agrometeorological models for crop yield assessment are available with various levels of complexity and empiricism. But, currently the development of wheat yield forecasting models in conventional operational systems do not reflect the loss of active green leaf area and its

relation to biotic and abiotic processes implicated in the crop production situation.

In 2009 a large field campaign in the Grand-Duchy of Luxembourg was realized to assess the validity of leaf-green-area approach to further improve the yield prediction. Hemispherical photography were taken above the canopy (between 0,60 and 1 meter) in winter wheat fields during the crop cycle, preferentially from inflorescence emergence to maturity. The variable of interest, the Green Area Index (GAI), was retrieved after image analyses using the CAN-EYE software. The regression-based models calculated with metrics derived from the decreasing curves of GAI showed that the final yield could be estimated with satisfactory precision: range of the coefficient of determination (R^2) varies from 0.73 to 0.86 and RMSE (root mean square error) is varying between 0,43 and 0,56 t.ha⁻¹.

The validation of such approach at the scale of an agricultural zone or region is currently under progress, by using green area index temporal profiles and information on the phenology of winter wheat. Such simple models may be considered as a first step towards yield estimation that may be completed by other agrometeorological models in order to provide a better integrated and more accurate yield assessment.

Key words: Wheat, Yield estimates, Green Area Index, Senescence, Hemispherical images.