
Suivi automatisé et modélisation de la cinétique de germination de grains de maïs par traitement d'images couleur

Alain Clément, Bertrand Vigouroux

*Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Automatisés (UPRES EA 4094)
Institut Universitaire de Technologie
4, Boulevard Lavoisier - BP 42018 - 49016 Angers Cedex*

alain.clement@univ-angers.fr ; bertrand.vigouroux@univ-angers.fr

Sections de rattachement : 61, 63

Secteur : Secondaire

RÉSUMÉ : L'évolution temporelle des propriétés géométriques d'un lot de 393 semences de maïs placées dans un incubateur de Jacobsen a pu être mesurée grâce au développement d'une chaîne automatisée d'acquisition et de traitement d'images couleur. Par l'analyse de ces propriétés géométriques, nous montrons que (i) la compacité des semences est un bon marqueur de l'apparition des germes et que (ii) l'imbibition de la graine suit une loi du premier ordre. Le système de vision fournit la distribution statistique des temps de germination, ainsi que celle des temps de relaxation de l'imbibition.

MOTS-CLÉS : Analyse d'images couleur, semences, maïs, imbibition, germination.

1. Introduction

L'évaluation de la qualité des semences est une préoccupation permanente pour l'industrie des semences (McDonald, 1998). Le taux d'imbibition et le taux de germination sont deux facteurs importants de la qualité. En pratique, le taux d'imbibition¹ des graines est évalué par la mesure de l'évolution de leur poids. Cette mesure est non seulement longue et fastidieuse, mais elle peut être imprécise pour les petites graines (Dell'Aquila et al. 2000). Le taux de germination² est une mesure importante pour l'évaluation de la vigueur. En pratique, cette mesure est effectuée par comptage. Des techniciens spécialisés examinent ainsi des centaines de graines,

¹ Pourcentage relatif d'imprégnation en eau.

² Pourcentage de graines pour lesquelles le germe est sorti dans un temps donné.

plusieurs fois par jour, avec généralement un manque de données au cours de la nuit et le week-end, de sorte que certaines parties intéressantes de la courbe de germination peuvent être manquantes.

Ces tâches très consommatrices de temps sont progressivement remplacées par des procédés automatisés qui tirent avantage de l'accroissement des capacités des systèmes de traitement de l'image. Les premiers systèmes n'étaient capables de suivre qu'un petit nombre de graines, 50 ou moins (van der Heijden et al. 1999, Geneve 2001, Hoffmaster et al. 2003, Oakley et al. 2004, Dell'Aquila 2005, Peñaloza et al. 2005, Dell'Aquila 2007). Cependant, l'évaluation de la qualité des semences, repose en général sur des multiples de 100 graines. Dans ce but, un système d'acquisition d'images pour la surveillance automatisée de la germination de 100 graines, dans un incubateur Jacobsen, a été développé il y a quelques années (Ducournau et al. 2004). Ce système est aujourd'hui en mesure de suivre la germination de 400 graines (Plainchault et al. 2007), à l'aide de 4 caméras (une caméra pour 100 graines) et permet des comptages réguliers à des intervalles de temps choisis. Cependant, le système ne peut fournir que le nombre total de graines germées et comme il fonctionne en comparant l'image au temps t à une image de référence au temps t_{ref} , ses résultats ne sont valables qu'à condition que la différence entre les images soit due à l'apparition de germes ce qui n'est pas le cas quand l'imbibition n'est pas terminée au temps t_{ref} .

Nous présentons ici une amélioration significative de ce système d'imagerie, consistant en un suivi individualisé de chaque semence. Le système analyse l'évolution des propriétés géométriques des graines dans l'incubateur, ce qui nous permet de proposer une modélisation de la cinétique de germination.

2. Matériel et méthodes

2.1. Acquisition et traitement des images

Comme décrit dans (Ducournau et al. 2004), des lots de graines (jusqu'à 400 graines) sont semés sur du papier buvard épais hydraté en permanence et maintenus dans l'obscurité à une température fixée (par exemple 15 ° C ou 20 ° C) pendant plusieurs jours dans un incubateur Jacobsen. Quatre caméras 3-CCD couleur sont utilisées pour l'acquisition des images. Les caméras sont contrôlées par un logiciel automatisé, qui pilote à chaque prise de vue l'ouverture et la fermeture du couvercle de l'incubateur, ainsi que l'éclairage de la scène. Ce système permet l'enregistrement continu de la germination à une fréquence choisie (généralement 12 ou 24 images par jour). Les images, codées en RVB, sont stockées dans une base de données. Toutes les images d'une même expérience de germination (en général 40 ou 50) sont traitées et analysées en une seule étape, au moyen de la plate-forme logicielle Isaac®, décrite dans (Clément 2001). Les images couleur sont binarisées (les graines et les germes en blanc, le fond en noir) par une analyse hiérarchique de l'histogramme de la composante rouge

(Clément et Vigouroux, 2002). La surface, le périmètre et les coordonnées du centre de masse de chaque semence sont calculés à partir de images binaires. Les graines sont étiquetées et les coordonnées de leur centre de masse sont utilisées pour les suivre³ individuellement d'une image à l'autre tout au long de la série temporelle. Un exemple est présenté en figure 1. Enfin, les surfaces et les périmètres des semences sont exportés dans un fichier Excel (une feuille par semence).

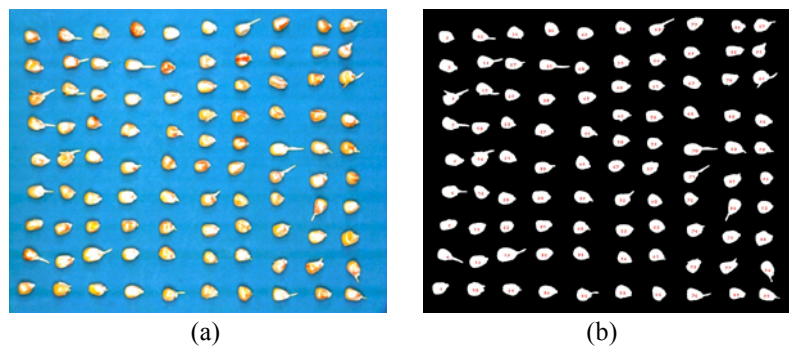


Figure 1 . Image RVB (a) et image binaire étiquetée (b) d'un lot de 95 graines de maïs 66 heures après semis (pour une seule des 4 caméras)

2.2. Modélisation de l'imbibition

L'imbibition des graines avant la germination entraîne une augmentation de leur volume et, par conséquent, de leur surface projetée sur les images. Il a été prouvé pour *Brassica oleracea* L. (Dell'Aquila et al. 2000) et *Medicago truncatula* (D. Demilly et al. 2007) que mesurer la surface des semences est une méthode pertinente pour le suivi de leur imbibition. Le cas le plus simple est celui où la courbe des surfaces en fonction du temps peut être séparée en trois parties (figure 2a) : la partie I montre l'augmentation de surface en raison de l'imbibition ; cette surface atteint un plateau (partie II) quand l'imbibition est complète puis augmente de nouveau en raison de l'émergence du germe (partie III). Malheureusement, il existe des cas où l'émergence du germe survient avant la fin de l'imbibition, ce qui entraîne l'absence de la partie II et rend l'interprétation de la courbe plus difficile. La difficulté peut être surmontée en considérant en plus de la surface (S), le périmètre (P) de la semence afin de calculer la compacité (C) :

$$C = \frac{4\pi S}{P^2} \quad [1]$$

Dans l'hypothèse où l'imbibition est un phénomène isotrope, les périmètres et les surfaces peuvent être exprimées par :

³ Lors de la croissance du germe, certaines gaines se déplacent en roulant sur elles-mêmes.

$$P(t) = \int_0^{2\pi} k(t) \cdot r_0(\theta) \cdot d\theta \quad S(t) = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} [k(t) \cdot r_0(\theta)]^2 \cdot d\theta \quad [2]$$

où $r_0(\theta)$ représente les positions des points du contour des semences en coordonnées polaires avant imbibition, et $k(t)$ l'augmentation de la taille en raison de l'imbibition. La compacité des semences vaut donc :

$$C = 2\pi \frac{\int_0^{2\pi} r_0^2(\theta) \cdot d\theta}{\left[\int_0^{2\pi} r_0(\theta) \cdot d\theta \right]^2} \quad [3]$$

Cette formule est indépendante du temps tant que le germe n'apparaît pas. Un exemple est donné par la figure 2b.

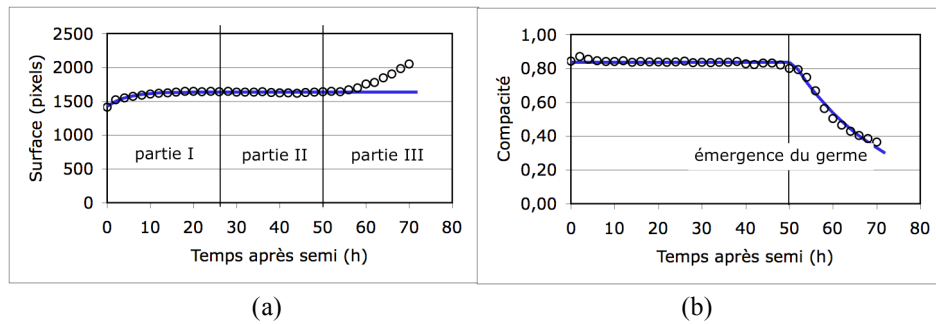


Figure 2 . Évolution temporelle de la surface (a) et de la compacité (b) de la graine (graine n°35 – figure 1b)

La modélisation de l'imbibition et de la germination peut donc être obtenue en suivant l'évolution temporelle de la surface et de la compacité des semences telles que mesurées par l'analyse d'images. En supposant que l'imbibition suive une loi du premier ordre, l'évolution temporelle de la surface des semences peut être exprimée par :

$$S(t) = S_M + (S_0 - S_M) \exp\left(-\frac{t}{\tau_S}\right) \quad [4]$$

où S_0 est la surface des semences avant imbibition, S_M la surface des semences après imbibition complète, et τ_S le temps de relaxation⁴ de cette surface. De façon analogue,

⁴ Temps au terme duquel le paramètre a décré d'un facteur e dans un processus du 1^{er} ordre.

l'évolution temporelle de la compacité peut être exprimée par :

$$C(t) = C_0 \exp(t - \tau_c) u(t - \tau_E) \quad [5]$$

où C_0 est la compacité constante des semences avant τ_E , l'instant d'émergence du germe, et τ_c est le temps de relaxation de la compacité. Dans cette expression, $u(\cdot)$ est la fonction d'Heaviside. Dans une première étape, les paramètres C_0 , τ_E et τ_c de chaque semence sont obtenus à partir des courbes $C(t)$, en utilisant le solveur d'Excel. Dans une deuxième étape, les courbes $S(t)$, pour des valeurs de t inférieures à τ_E , fournissent S_0 , S_M et τ_S . Dans le cas où les surfaces sont calculées en nombre de pixels, en raison de l'absence d'étalonnage de la machine de vision, la seconde étape donne τ_S et le ratio S_M / S_0 .

3. Résultats

Un lot de 393 semences de maïs (*Zea mays* L.) a été choisi pour illustrer la méthode. Les grains ont été placés dans un incubateur de Jacobsen à une température de 20 ° C. Chacune des quatre caméras a pris une image toutes les deux heures, sur une période de 72 heures, fournissant un total de 148 images qui ont été analysées de façon automatisée, comme indiqué dans la section 2.

La première image de la série temporelle permet de caractériser les grains avant le démarrage de l'imbibition. La compacité moyenne est de 0,82 avec un écart type de 0,03. L'histogramme des surfaces des grains au temps zéro est donné sur la figure 3 ; La distribution est gaussienne, avec un ratio de 2,39 entre la plus grande et la plus petite des semences.

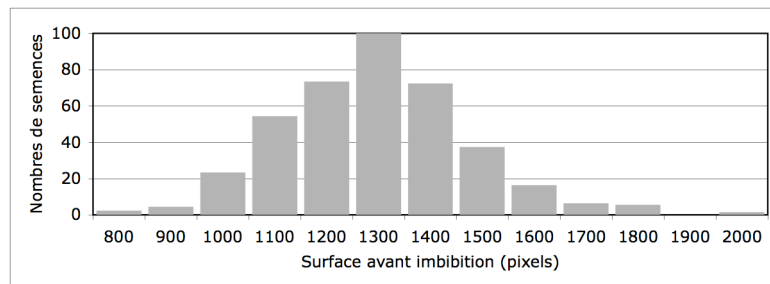


Figure 3 . Histogramme des surfaces des grains avant imbibition (lot de 393 semences de maïs)

Les erreurs quadratiques moyennes (RMSE) entre les compacités mesurées expérimentalement et les valeurs théoriques (équation 5) sont comprises entre 0,005 et

0,046 pour l'ensemble des 393 grains, avec une valeur moyenne de 0,012, ce qui justifie le choix du modèle. La connaissance du temps de germination τ_E fourni par la machine de vision permet de représenter le nombre de grains germés en fonction du temps (ligne continue sur la figure 4). Comme attendu, la courbe a la forme d'une fonction de distribution gaussienne (en pointillés sur la figure 4).

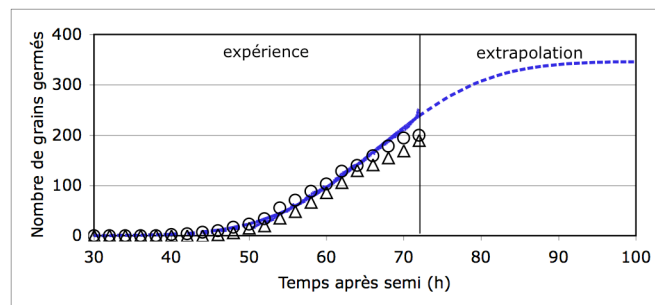


Figure 4 . Nombre de grains germés en fonction du temps : valeurs mesurées par traitement d'images en trait continu, valeurs gaussiennes théoriques en pointillés, et mesures de 2 experts représentées par les ronds et les triangles

En comptant le nombre de grains germés sur les images, deux techniciens expérimentés ont obtenu - pour l'ensemble des 393 semences de maïs - les valeurs indiquées sur la figure 4 par des cercles (expert n°1) et des triangles (expert n°2). Il y a une bonne correspondance entre les trois évaluations (une par l'analyse d'images, deux par les experts). Le travail des experts est facilité s'ils peuvent observer une série de quelques images (en général 5) avant et après la germination. Malheureusement, la procédure est impossible vers la fin de l'expérience (72 heures). Cela pourrait expliquer le décalage entre les courbes de la figure 4, pour les temps de plus de 66 heures. Néanmoins, ces résultats confirment, sur un échantillon significatif de près de 400 graines, qu'il est pertinent d'évaluer la cinétique de germination à partir de l'évolution temporelle de la mesure de compacité.

Avant l'émergence du germe (c'est-à-dire pour $t < \tau_E$), les surfaces mesurées expérimentalement correspondent bien aux surfaces théoriques (équation 4) : pour les 393 grains, les RMSE varient de 2 à 59 pixels, avec une valeur moyenne de 13 pixels (ces valeurs doivent être comparées à la moyenne des surfaces avant imbibition, soit 1342 pixels). La capacité d'imbibition peut être évaluée par le ratio S_M / S_0 et le temps de relaxation τ_S . Pour notre lot, le ratio S_M / S_0 varie de 1,16 à 1,29, soit une moyenne de 1,20 et un écart type de 0,03. Il est donc sensiblement constant, bien que la surface avant imbibition varie beaucoup d'un grain à l'autre (figure 3). Le temps de relaxation de l'imbibition révèle de grandes différences entre les grains (figure 5) : τ_S varie de 1,0 à 76,1 heures, avec une valeur moyenne de 8,6 heures et suit une distribution qui n'est pas gaussienne :

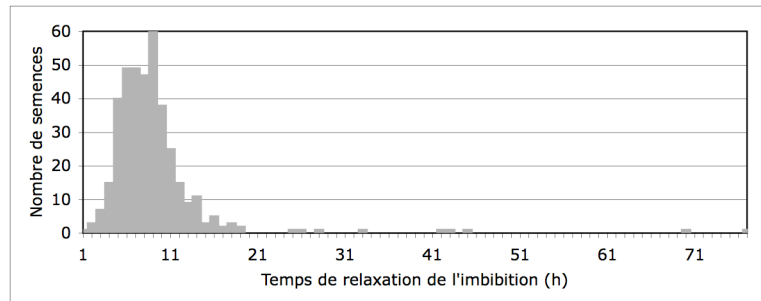


Figure 5 . *Histogramme des temps de relaxation de l'imbibition (lot de 393 semences de maïs)*

4. Conclusion et perspectives

Nous avons démontré que le suivi de l'évolution temporelle des propriétés géométriques des semences pendant leur germination dans un incubateur Jacobsen permet de modéliser leur cinétique de germination en distinguant les phases d'imbibition et de germination. La compacité des semences est un bon critère pour détecter l'apparition du germe, et la surface des semences montre que l'imbibition des grains de maïs suit une loi de premier ordre. La machine de vision utilisée dans cette démonstration est entièrement automatisée et peut traiter jusqu'à 400 graines en parallèle. Son utilisation peut contribuer à obtenir une meilleure connaissance des processus d'imbibition et de germination pour d'autres semences que le maïs, facilitant ainsi l'évaluation de la qualité des lots de semences.

Remerciements

Nous tenons à remercier la Station Nationale d'Essai des Semences (SNES, Angers, France) pour nous avoir fourni les images utilisées dans cette publication et tout particulièrement M.H. Wagner pour son travail d'expertise (expert n°2 dans le texte). Enfin, nous soulignons que ce travail a bénéficié en partie d'une subvention de la Région des Pays de la Loire (France).

Bibliographie

Clément A., Isaac : une plate-forme pour le développement et la mise en routine de méthodes d'analyse et de traitement d'images en couleur. Actes du *Colloque National de Recherche dans les Instituts Universitaires de Technologie*, 13 – 15 juin 2001, Roanne, France, p. 413-422.

- Clément A., Vigouroux B., Unsupervised classification of pixels in color images by hierarchical analysis of bi-dimensional histograms. Proceedings of the *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 6 – 9 October 2002, Hammamet, Tunisia, 2, p. 85-89.
- Dell'Aquila A., van Eck J. W., van der Heijden G. W. A. M., The application of image analysis in monitoring the imbibition process of white cabbage (*Brassica oleracea* L.) seeds. *Seed Science Research*, vol. 10, 2000, p.163-169.
- Dell'Aquila A., The use of image analysis to monitor the germination of seeds of broccoli (*Brassica oleracea*) and radish (*Raphanus sativus*). *Annals of Applied Biology*, vol. 146, 2005, p. 545-550.
- Dell'Aquila A., Pepper seed germination assessed by combined X-radiography and computer-aided imaging analysis. *Biologia Plantarum*, vol. 51, 2007, p. 777-781.
- Demilly D., Wagner M.H., Brunel S., Dürr C., Vigouroux B., Using computer vision to analyse the relationship between physical characteristics of *Medicago truncatula* seeds and their germination and root elongation. Actes du *Colloque Végétal et Semences*, 29 – 30 novembre 2007, Angers, France.
- Ducournau S., Feutry A., Plainchault P., Revollon P., Vigouroux B., Wagner M. H., An image acquisition system for automated monitoring of the germination rate of sunflower seeds. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 44, 2004, p. 189-202.
- Geneve R. L., Kester S. T., Evaluation of seedling size following germination using computer-aided analysis of digital images from a flat-bed scanner. *HortScience*, vol. 36, 2001, p. 1117-1120.
- Hoffmaster A. L., Fujimura K., McDonald M. B., Bennett M. A., An automated system for vigor testing three-day-old soybean seedlings. *Seed Science and Technology*, vol. 31, 2003, p. 701-713.
- McDonald M. B., Seed quality assessment. *Seed Science Research*, vol. 8, 1998, p. 265-275.
- Oakley K., Kester S. T., Geneve R. L., Computer-aided digital image analysis of seedling size and growth rate for assessing seed vigour in *Impatiens*. *Seed Science and Technology*, vol 32, 2004, p. 907-915.
- Peñaloza P., Ramirez-Rosales G., McDonald M. B., Bennett M. A., Lettuce (*Lactuca sativa* L.) seed quality evaluation using seed physical attributes, saturated salt accelerated aging and the seed vigour imaging system. *Electronic Journal of Biotechnology*, vol. 8, 2005, p. 299-307.
- Plainchault P., Demilly D., Vigouroux B., Bertrand D., Feutry A., De l'analyse d'image au suivi de la germination : utilisation de la vision artificielle appliquée au végétal. Actes du *4^e colloque interdisciplinaire en instrumentation*, 17 – 19 octobre 2007, Nancy, France, p. 40-45.
- Van der Heijden G., Polder G., van Eck J. W., Jalink H., van der Schoor R., Automatic determination of germination of seeds. Proceedings of the *World Seed Conference*, compiled and edited by the ISTA Secretariat, 1999, p. 151-160.