

ELONCAM, un nouvel outil d'instrumentation pour le suivi automatisé et individualisé du développement des plantules

Correspondance
angelique.juret@geves.fr

Angélique Juret-Delanoue¹
Marie Hélène Wagner¹
Didier Demilly¹,
Audrey Dupont¹
Sylvie Ducournau¹

Résumé.

La germination des semences et la croissance des jeunes plantules représentent des étapes essentielles pour l'implantation d'une culture. Vitesse, homogénéité de germination et croissance sont par conséquent des paramètres importants à mesurer pour évaluer la vigueur des semences ou caractériser la diversité génétique dans des conditions de semis variées. Le système de vision, ELONCAM, vise à contribuer au phénotypage automatisé des semences et plantules. Il permet de déterminer la capacité à germer et la vitesse de croissance de différents génotypes, en vue d'évaluer leurs propriétés physiologiques dans différentes conditions. Il s'agit d'un système d'imagerie composé de deux caméras disposées l'une au-dessus de l'autre et fixées sur un bras coulissant dans une enceinte climatique. Les caméras se déplacent à l'aide du rail automatisé relié au système d'acquisition d'images piloté par ordinateur. L'acquisition des images des plantules au cours de la phase de croissance hétérotrophe est effectuée en lumière verte. À l'issue des acquisitions d'images, le traitement d'image permet d'obtenir le temps de germination pour chaque semence et les cinétiques de croissance par organe aérien ou racinaire des plantules étudiées.

Mots-clés

Automatisation, images, croissance hétérotrophe, germination, semences, phénotypage.

¹ GEVES, Station Nationale d'Essais de Semences, 25 rue Georges Morel, 49071 Beaucouzé, France

ELONCAM, a new instrument for automated and individualized monitoring of seedling development

Correspondance
angelique.juret@geves.fr

Angélique Juret-Delanoue¹
Marie Hélène Wagner¹
Didier Demilly¹,
Audrey Dupont¹
Sylvie Ducournau¹

Abstract.

Seed germination and seedling growth are essential steps for field emergence. Speed, germination homogeneity and growth are therefore important parameters to assess seed vigor or to characterize genetic diversity under various seeding conditions. The ELON-CAM vision system is aimed at contributing to the automated phenotyping of seeds and seedlings. It allows determining germination capacity and growth rate of different genotypes to evaluate their physiological traits in a wide range of conditions. It is an imaging system consisting of two cameras placed one above the other and fixed on a sliding arm in a climatic chamber. The cameras move on an automated rail connected to the computer-controlled image acquisition system. The acquisition of seedling images during the heterotrophic growth phase is done under green light. After image acquisition, image processing is performed to obtain the germination time for each seed and the growth kinetics of the aerial and root parts of the seedlings studied.

Keywords

Automation, imaging, heterotroph growth, germination, seed, phenotyping.

¹ GEVES, Station Nationale d'Essais de Semences, 25 rue Georges Morel, 49071 Beaucouzé, France.

Introduction

Dans le cadre de projets de recherche visant à différencier des génotypes en conditions pénalisantes, il est difficile de mesurer au champ les paramètres de croissance de la semence à la plantule.

Dans un contexte de développement de nouvelles méthodes innovantes au sein du GEVES, le prototype ELONCAM, a été développé par l'ESEO¹ en collaboration avec le LARIS², la SNES au GEVES³ et INRAE⁴ d'Angers (Benoit, 2015 a, b, c). Cette nouvelle technologie, utilisée au laboratoire et nommée ELONCAM (Figure 1), permet de différencier les génotypes dès leur germination jusqu'au stade de jeunes plantules et de mesurer leur développement à l'aide d'acquisitions et d'analyses d'images. Ce système a été utilisé pour caractériser différentes espèces comme *Medicago truncatula*, colza, blé, tournesol, et également la betterave dans le cadre du programme ANR Investissements d'Avenir AKER (Huygue et al., 2020).

Les génotypes étudiés sont placés dans un environnement où la température, l'apport en eau et le support de culture sont contrôlés tout en respectant le géotropisme des plantes. Les acquisitions d'images sont réalisées en lumière LED verte inactinique pour simuler l'obscurité et conserver une croissance hétérotrophe des plantules. Les flashes lumineux en lumière verte sont synchronisés avec les prises de vue.

Cet article présente la méthode ainsi que des exemples d'application comme la tolérance au froid chez la betterave et le tournesol.

Description de l'équipement et principe de la méthode

Équipement

L'outil ELONCAM est un banc de phénotypage (Figure 1) possédant deux rails d'envergure 7 m x 1,5 m, sur lesquels couissent deux caméras Prosilica GC2450 Allied Vision Technology 5 MPix : l'une sur le rang du haut, l'autre sur la rangée basse. Celles-ci permettent de prendre des images à intervalles réguliers des essais placés sur le banc. Cet appareil est placé dans un module climatique dédié pour cet outil et dont les plages de température peuvent varier de 10 à 30 °C. Il permet d'analyser en simultané 40 germoirs (20 germoirs rail haut + 20 germoirs rail bas).

Les germoirs ont une dimension de 235 x 235 x 20 mm avec une capacité des germoirs de 10 semences par boîte. Le choix des substrats est important ; il est possible de travailler en gélose ou en papier, cela permet d'obtenir des images de plantules illuminées en backlight tout au long de l'essai (Figure 2). Cependant, des essais préalables sur milieu gélosé ayant conduit à des problèmes sanitaires et à une préparation importante, le choix du substrat s'est porté sur du papier absorbant, référence Dutscher SAS 475035.

Mise en place des essais

Du papier absorbant, humidifié selon les modalités définies, eau ou solutions de polyéthylène glycol pour simuler un stress hydrique, est déposé au fond du germoir (Figure 3) afin d'assurer l'imbibition des semences. Les semences sont déposées sur une ligne fixée selon l'organe dont on sou-



Figure 1. Banc ELONCAM



Figure 2. plantules en backlight

¹ École Supérieure d'Électronique de l'Ouest (ESEO) Angers, France.

² Laboratoire angevin de Recherche en Ingénierie des systèmes (LARIS), Université d'Angers, France.

³ Station nationale d'essais de semences (SNES), secteur technique du Groupe d'étude et de contrôle des variétés et des semences (GEVES) Beaucauzé, France.

⁴ Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE), Beaucauzé, France.



Figure 3. Dépose du papier absorbant humide au fond du germoir

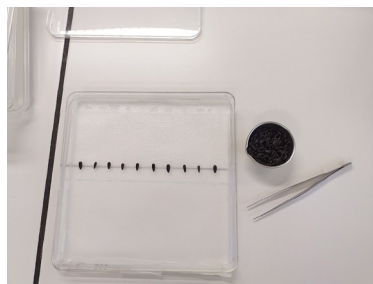


Figure 4. Semis des 10 semences sur le papier absorbant



Figure 5. Pose du papier absorbant pour recouvrir les semences

haite suivre la croissance le plus longtemps, à raison de 10 semences par germoir (Figure 4). Puis, une autre feuille de papier absorbant, humidifiée dans les mêmes conditions, est déposée par-dessus afin de maintenir les semences et d'uniformiser leur imbibition (Figure 5).

Une bande de parafilm est placée autour des germoirs afin d'en assurer l'étanchéité tout au long de l'essai (Figure 6). Selon la qualité germinative du matériel végétal, trois à quatre germoirs sont semés de façon à obtenir une trentaine de plantules mesurables. Les germoirs sont ensuite placés à la verticale, pour respecter le géotropisme, dans le module dédié à ELONCAM préalablement réglé à la température voulue (Figure 7).

Un protocole de désinfection du matériel a été mis en place afin d'éviter toutes contaminations : les germoirs sont lavés à 65 °C puis désinfectés en appliquant de l'alcool à 70° avant le semis. Une identification des germoirs (génotype et position dans l'enceinte) est notée sur l'extérieur de la boîte afin d'assurer la traçabilité des essais.

Création d'une campagne d'acquisition d'images

L'outil ELONCAM est piloté par le logiciel ESEO MultiBanc, via un ordinateur relié au système d'acquisition des images. Ce dernier dispose d'une interface permettant de régler la fréquence des prises de vue, le délai éventuel entre la première (au lancement) et la seconde image et la durée totale de l'essai. Compte tenu d'un éclairage en lumière verte lors des prises de vue, nous utilisons uniquement le canal vert et produisons ainsi des images en niveaux de gris.

Le programme de lancement permet également de tracer l'espèce, l'étude ou le projet de recherche concerné. Ces informations seront reprises dans le libellé des images au fur et à mesure de leur acquisition et sauvegarde.

L'automatisation du positionnement des caméras devant les boîtes et des prises de vue est réglée selon les modalités définies à chaque enregistrement de nouvelle campagne. Un contrôle visuel des images peut être réalisé en cours d'essai. À chaque germoir, placé dans le module,

correspond un dossier de sortie contenant l'intégralité des images réalisées durant la campagne et classées chronologiquement. Toutes les images acquises sont automatiquement sauvegardées sur le disque dur de l'ordinateur et classées dans des dossiers, identifiés selon le positionnement du germoir sur le banc.



Figure 6. Ajout d'une bande de parafilm pour étanchéifier les germoirs



Figure 7. Pose des germoirs sur le banc ELONCAM dans le module

Analyses d'images et mesures des organes de la plantule

Lorsque la campagne est terminée et la sauvegarde des fichiers effectuée, l'analyse des images peut alors débuter. Elle est réalisée via le logiciel libre d'accès ImageJ.

L'importation des images sous forme de séquences d'images (stack) permet de visualiser graine à graine la dy-

namique de germination puis la croissance des plantules. Le nom des images s'affiche en entête ce qui permet de disposer de la codification du germe, de la date de prise de vue et du numéro de l'image (Figure 8).

Ce logiciel offre de nombreuses possibilités de mesure et permet ainsi de caractériser les différents organes de la plantule. Il permet également d'identifier l'heure de germination des semences avec précision (Figure 9). Une fois les options de mesure choisies et le curseur sélectionné, il est possible, sur chaque image, de mesurer l'organe désiré. Dans les exemples d'application ci-dessous nous avons mesuré les longueurs des racicules et des hypocotyles. La mesure des organes s'effectue en cliquant du point de départ de l'organe désiré avec le curseur jusqu'à la fin de l'organe en mode multipoints, afin de suivre au mieux la forme de l'organe pour mesurer sa longueur courbe (Figures 10 et 11). Ce logiciel permet d'enregistrer les mesures effectuées et les informations liées aux mesures (emplacement du germe, date et heure de la prise de vue) qui ont été automatiquement tracées par le logiciel d'acquisition d'images. Les mesures réalisées en pixels sont converties en mm (1 mm = 9 pixels) et les matrices de résultats « Results » sont enregistrées directement sous Excel. Un protocole a été rédigé en interne au GEVES pour faciliter l'utilisation de l'outil de mesure ImageJ.

Exemples d'application

La tolérance au froid chez la betterave

Cet exemple porte sur un travail de recherche dans le cadre d'un projet d'investissement d'avenir nommé AKER « Innover pour une filière française durable : réinvestir la diversité allélique de la betterave par le développement de nouveaux outils -omics et de nouvelles stratégies de sélection » (<http://www.aker-betterave.fr>).

Ce projet ayant pour but d'améliorer la compétitivité de la betterave en doublant le rythme de croissance annuelle de son rendement en sucre, 2 744 génotypes ont été phénotypés pour leur germination à 5 °C sur des bancs de germination (Ducournau et al., 2020). L'objectif étant de déterminer si une diversité génétique existe et pourrait être exploitée pour la tolérance au froid à des stades précoces.

Ce premier phénotypage a été réalisé sur des automates dédiés aux cinétiques de germination par analyse d'images (Demilly et al., 2014) à une température proche de la température de base pour l'espèce ; à la sortie, 136 génotypes d'intérêt ont été sélectionnés pour leur vitesse de germination contrastée : vitesse élevée pour les génotypes tolérants au froid ou faible pour les sensibles. Tous ces génotypes ont été phénotypés avec ELONCAM afin de comparer leurs vi-

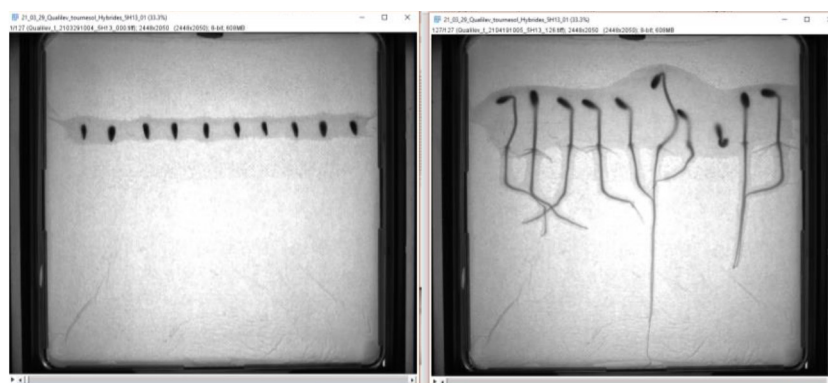


Figure 8. Image réalisée grâce à l'une des caméras placées sur le dispositif ELONCAM à deux temps différents d'un même essai.

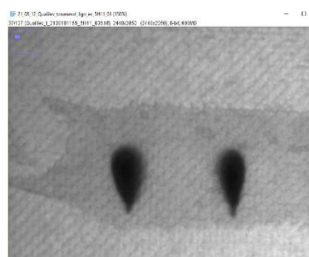


Figure 9. Relevé de germination individuel des semences.

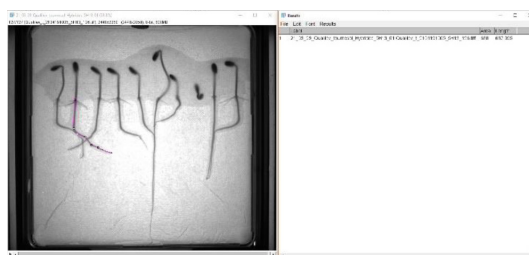


Figure 10. Mesure individuelle longueur racine. La mesure s'enregistre dans un fichier 'results' en pixels. (1mm= 9 pixels)

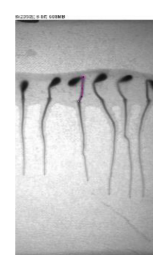


Figure 11. Mesure individuelle longueur hypocotyle

tesses de croissance à une température moins froide pour limiter la durée des essais, notamment pour les génotypes ayant déjà des difficultés à germer à basse température.

Les conditions d'essais

Les essais de croissance ont été réalisés à 10 °C sur ELONCAM pendant 21 jours avec une fréquence de 4 h entre chaque prise de vue. Trois répétitions de 10 graines ont été semées entre 2 buvards humidifiés avec de l'eau désionisée pour chaque génotype.

Résultats

Deux groupes différents pour leur vitesse de germination à 10 °C (Tableau 1) ont été étudiés. Seule la longueur de la radicule a été évaluée sur l'ensemble des 136 génotypes lors des essais de croissance. La figure 12 est une représentation graphique des temps de germination et des longueurs de la radicule des 136 génotypes.

Les moyennes de vitesse de germination et de longueur de la radicule mesurée de ces deux groupes sont relativement équivalentes.

Les génotypes les plus rapides à germer (moins de 120 h) n'ont pas tous des radicules longues et les génotypes les plus lents (plus de 192 h) n'ont pas tous des radicules courtes. La longueur de radicule minimum (12,6 mm) a été observée pour un génotype provenant du groupe sensible au froid ;

cependant, un autre génotype du même groupe présente une radicule nettement supérieure (52,9 mm). La même observation est faite dans le groupe des génotypes tolérants. Un focus sur 4 génotypes appartenant aux deux groupes illustre nettement que les deux phases germination et croissance hétérotrophe répondent différemment au froid (Figure 13 a, b).

Les génotypes A3 et A4 ont en effet une germination plutôt rapide au froid, mais leur croissance racinaire est différente : A4, qui germe rapidement, a une croissance plutôt lente comme A1, tandis que A2, qui germe lentement, a une croissance rapide comme A3. Quant à la croissance aérienne au froid, elle est quatre fois moins importante que la racine 10 jours après germination pour les génotypes à croissance racinaire rapide ; on observe également une moindre variabilité entre les génotypes sur la croissance de l'hypocotyle. Les résultats indiquent donc qu'il existe une diversité génétique sur la vitesse et le taux final de germination à 10 °C. Aucune relation n'a été observée entre le taux de germination et la croissance racinaire après 21 jours à 10 °C.

Le programme AKER a permis de collecter une large gamme de génotypes et d'organiser leur exploration aux niveaux génétique et phénotypique. Un certain nombre de caractères montrant une variabilité ont été révélés, notamment la germination et la croissance précoce. Cela permettra d'améliorer les cultivars de betterave sucrière en vue de leur adaptation au changement climatique.

Tableau 1: Caractéristiques mesurées pour 43 génotypes sensibles au froid et 93 génotypes tolérants au froid sur l'outil ELONCAM

Temps de germination à 10 °C			
	Temps moyen de germination (h)	Temps min. de germination (h)	Temps max. de germination (h)
Control	157	100	424
Génotypes tolérants à 5 °C	134	115	163
Génotypes sensibles à 5 °C	171	139	207
Longueur de la radicule évaluée 7 jours après germination à 10 °C			
	Longueur moyenne radicule (mm)	Longueur min. radicule (mm)	Longueur max. radicule (mm)
Control	42,8	6,9	75,4
Génotypes tolérants à 5 °C	40,1	21,8	60
Génotypes sensibles à 5 °C	38,1	12,6	52,9

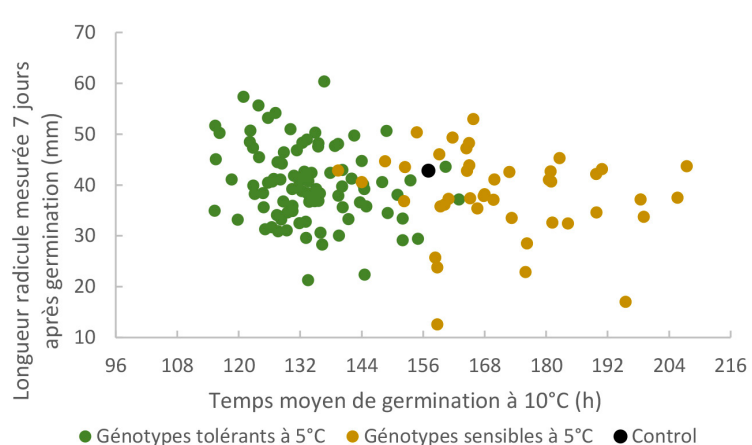


Figure 12. Longueur racinaire mesurée 7 jours après germination à 10°C en fonction du temps de germination des géotypes tolérants et sensibles au froid.

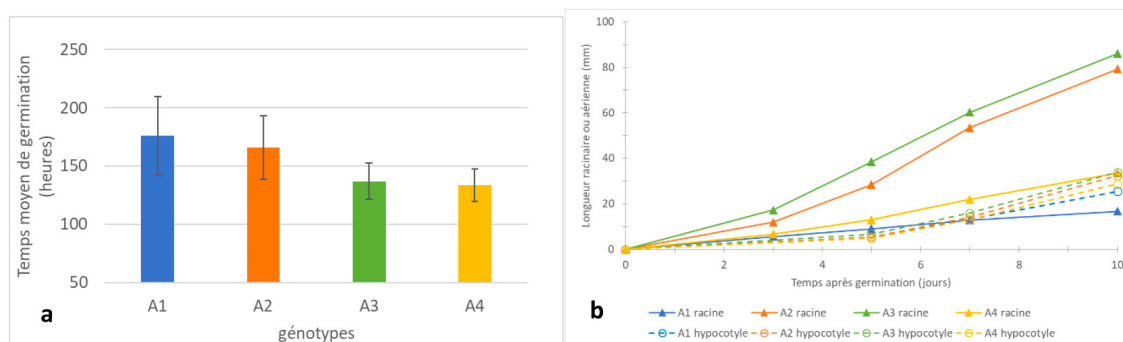


Figure 13. a) Temps de germination moyen ($\pm$ ET, 3×10) pour les quatre géotypes à 10 °C, deux géotypes sensibles au froid et deux tolérants au froid. b) Longueur des racines en trait plein et de l'hypocotyle en pointillés, mesurées à 3, 5, 7 et 10 jours après la germination.

La tolérance au froid sec chez le tournesol

Les conditions environnementales ont un impact fort sur la croissance des plantules et un cumul de stress abiotique est encore plus délétère pour la jeune plantule. Cependant, il semble exister une forme d'acclimatation des semences en fonction des conditions de germination. Caractériser finement la qualité germinative des variétés, en étudiant leur réponse au stress thermique et au stress hydrique, permet de mettre en évidence une différence de capacité germinative des semences, de divers variétés et lots, qui n'apparaît pas lorsque celles-ci sont placées en conditions optimales.

Ainsi, afin de caractériser le comportement de ressources génétiques en vue d'un semis précoce sur le tournesol, dans le cadre du projet FSRSO Qualilev : « Améliorer la qualité germinative et la vitesse de levée des semences de tournesol en conditions pénalisantes », des essais ont été mis en place pour cribler des ressources génétiques adaptées à des conditions froides et sèches de levée au champ. La température froide a été fixée à 10 °C et les conditions de stress hydrique ont été mises au point de façon à être suffisamment discriminantes sur la vitesse de croissance tout en tenant compte de la nécessité d'évaluer la croissance des plantules semées à une profondeur de 2 cm au champ.

Les conditions d'essais

Cinq hybrides ont été analysés à 10 °C pour déterminer le potentiel hydrique de la solution d'imbibition à appliquer pour ce projet.

Les essais de croissance ont été réalisés sur ELONCAM pendant 28 jours (Figure 14 a et b) avec une fréquence de 4 h

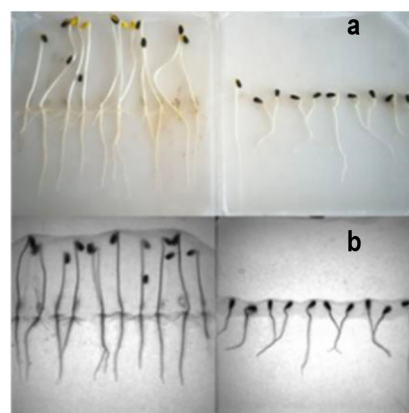


Figure 14. a) Photographie d'un hybride après 28 jours à 10°C, modalité témoin (eau) à gauche et modalité stress hydrique (PEG à -0,4 MPa) à droite. b) prise de vue sous image J du même hybride dans les mêmes conditions.

entre chaque prise de vue. Trois répétitions de 10 akènes par hybride ont été semées entre 2 buvards humidifiés à l'aide de solutions de PEG (polyéthylène glycol) à 3 concentrations différentes (-0,4 MPa, -0,201 MPa et -0,118 MPa) et un témoin eau.

Résultats

Les premiers essais menés sur cinq hybrides à une concentration de polyéthylène glycol à -0,4 MPa ont permis d'évaluer la longueur moyenne des hypocotyles (Figure 15a) et des racicules (Figure 15b).

moins pénalisantes avec une concentration de PEG à -0,2 MPa (Figure 16).

À la condition -0,2 MPa, la croissance aérienne est meilleure mais reste limitée, sur 28 jours d'essais, pour obtenir de la variabilité entre génotypes. En fin d'essais, l'hypocotyle n'atteint pas une longueur suffisante pour simuler des taux de levée corrects à une profondeur de semis comprise entre 2 et 4 cm. C'est pourquoi, le stress hydrique a été ramené à -0,118 MPa pour le phénotypage final de la croissance à 10 °C des 74 hybrides (Tableau 2). Ceci a également permis d'augmenter le débit d'analyse en réduisant la durée des essais à 3 semaines, ce qui correspond davantage à une du-

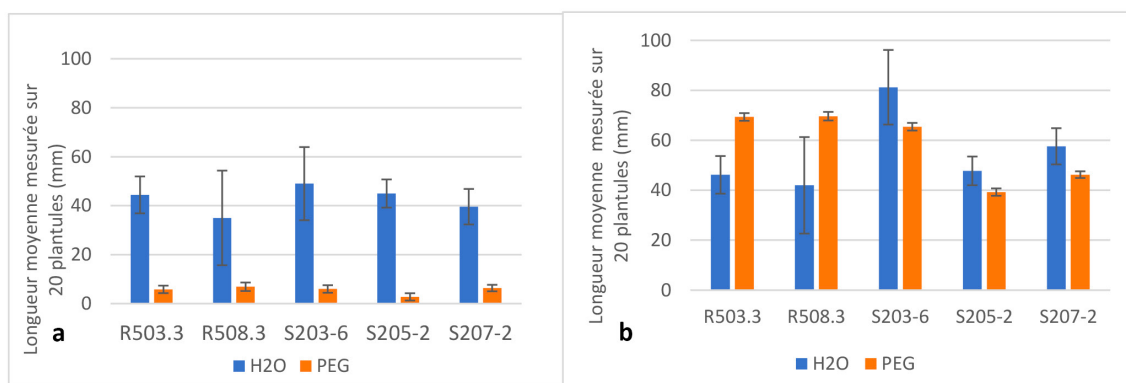


Figure 15. Longueur moyenne de 20 plantules par hybride après 18 jours de croissance verticale à 10 °C sur buvard humidifié soit avec de l'eau soit avec une solution de PEG à -0,4 MPa. a : longueur des hypocotyles b : longueur des racines.

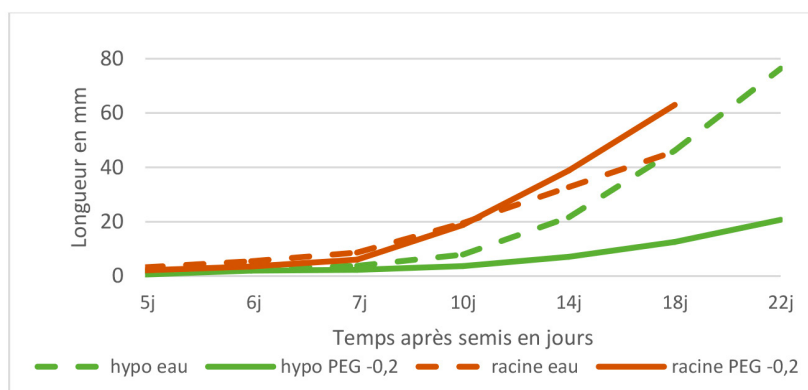


Figure 16. Cinétique moyenne de croissance des organes racinaires et aériens des 5 hybrides selon le milieu.

La condition - 0,4 MPa s'est avérée trop pénalisante pour espérer simuler une levée des hybrides sur 28 jours, à cause d'un développement insuffisant de l'hypocotyle. Cette condition n'a pas permis de différencier les hybrides sur leur croissance aérienne. Le développement racinaire était, quant à lui, favorisé pour 2 des 5 hybrides étudiés dans ces conditions défavorables.

Les mêmes hybrides ont alors été testés en conditions

réée acceptable pour observer une levée au champ.

Les essais de croissance menés sur 21 jours sur les hybrides ont montré que le stress modéré (-0,118 MPa) avait un fort impact sur la croissance racinaire au détriment de l'hypocotyle, mais permettait de cribler les génotypes les mieux adaptés à ces conditions de milieu. En prenant en compte une longueur d'hypocotyle finale supérieure à 20 mm comme critère de levée, 55 hybrides auraient levé après 21 jours à 10 °C et -0,118 MPa, dont 14 avec plus de

Tableau 2 : Caractéristiques aériennes et racinaires mesurées pour 74 hybrides à 10°C -0.118 MPa

Longueur des hypocotyles à 10 °C -0.118 MPa (mm)					
	5 j	7 j	10 j	14 j	21 j
Longueur moyenne	0	2,9	5,0	10,0	28,9
Longueur max.	0	4,3	6,5	16,0	55,1
Longueur min	0	1,7	3,2	6,6	12,7
Longueur des racines à 10 °C -0.118 MPa (mm)					
	5 j	7 j	10 j	14 j	21 j
Longueur moyenne	3,3	10,2	28,9	58,6	122,4
Longueur max.	5,9	17,3	54,1	128,5	230,4
Longueur min	1,2	4,2	14,4	26,6	42,1

40 mm d'hypocotyle. Un quart des hybrides analysés n'aurait, quant à lui, pas levé au champ après trois semaines, dans des conditions froides et sèches.

Vers une mesure automatique des longueurs d'organes sur images

En parallèle des mesures manuelles sur images de la longueur de la radicule et de l'hypocotyle, un traitement automatisé a été développé par une macro dans le langage macro d'ImageJ avec une segmentation des images et des mesures par plantule. La macro détecte et isole les

semences puis les plantules, après germination, et les mesure individuellement.

La comparaison aux mesures manuelles a donné des résultats prometteurs en termes de vitesse sur l'espèce tournesol. La longueur finale de la racine est, cependant, sous-estimée après segmentation du fait de sa finesse à l'extrémité distale (Figure 17). Les hybrides évalués 507-6 et H1-2 ont ainsi des vitesses comparables en automatique, supérieures à celles de H3-4 et 510-2. Seul l'hybride 510-5 présente un profil différent de croissance racinaire entre mesures automatiques et manuelles.

L'algorithme de traitement est en cours de validation sur un plus grand nombre de génotypes (Figure 18). La germination a d'ores et déjà été validée sur un grand nombre d'es-

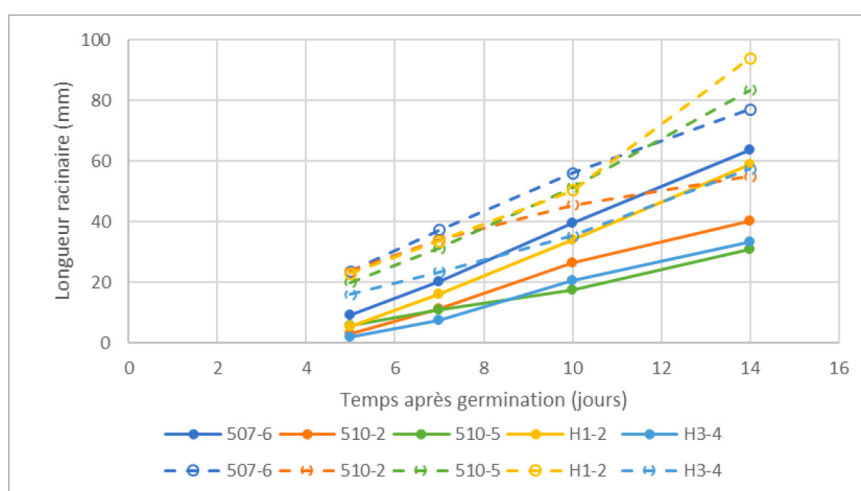


Figure 17. Comparaison des cinétiques de croissance racinaire automatiques (en traits pleins) ou manuelles (en pointillés) entre 7 et 14 jours après germination

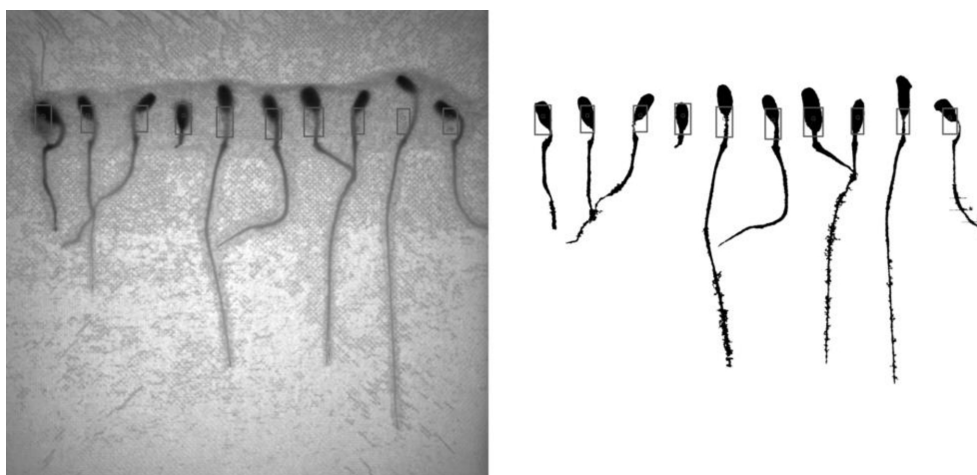


Figure 18. Segmentation des images prises au cours de la croissance au froid du tournesol. L'opérateur dispose de la pile d'images natives à gauche et de celle des images segmentées à droite pour valider la durée de suivi pour chaque semence individuellement.

sais ; cette mesure permet de détecter, de façon séparée, la vitesse de croissance et la vitesse de germination en exprimant l'allongement racinaire ou aérien en temps après germination. La partie aérienne est suivie jusqu'au seuil de 20 mm pour estimer un taux de levée.

La mesure de l'allongement racinaire est souvent interrompue en automatique, soit parce que la plantule atteint les bords du germoir, soit par croisement ou contact sur une grande longueur de racines voisines. Afin de gérer les croisements de plantules, un algorithme de suivi de structures arborescentes est en cours de développement. Pour améliorer le traitement d'image en automatique, il est possible de réduire le nombre de semences par boîtes. Cependant cela diminuerait fortement le débit.

Conclusion

L'outil ELONCAM et le traitement des images via le logiciel ImageJ, présentés ici, permettent d'obtenir, une fois la germination des semences effective, des cinétiques de croissance des organes aériens et racinaires des plantules en

contrôlant les conditions thermiques et hydriques. Il permet ainsi de phénotyper des semences, de collecter une large gamme de génotypes et de cribler les génotypes les mieux adaptés aux conditions du milieu.

C'est un outil de phénotypage polyvalent qui permet d'étudier un panel d'espèces variées sur des thématiques diverses comme la résistance au stress abiotique ou la croissance en présence de biostimulants. Ainsi, il donne la possibilité de sélectionner des ressources génétiques adaptées au changement climatique pour l'agriculture de demain.

L'automatisation ayant fait ses preuves de conception, il reste à affiner la segmentation des parties aériennes pour se focaliser sur l'hypocotyle et ainsi obtenir des cinétiques automatisées pour l'organe de levée aussi précises que celles de la racine principale. L'enceinte climatique permettant d'accueillir un second rail de 40 positions, le débit pourrait être doublé, à terme, et permettre ainsi d'étendre plus rapidement les mesures de croissance à d'autres espèces ■

Angélique Juret-Delanoue

Technicienne de recherche INRAE au laboratoire de germination de la SNES (station nationale d'essais de semences). Responsable des essais sur ELONCAM et des analyses d'images.



Marie-Hélène Wagner

Ingénieure d'études, responsable recherche et développement au sein de la SNES et membre du comité vigueur de l'ISTA.



Didier Demilly

Ingénieur de recherche, coordinateur des activités de phénotypage et métrologie au GEVES, directeur adjoint de la plateforme de phénotypage PHENOTIC et président du comité Proficiency test de l'ISTA et membre du comité des règles ISTA (International Seed Testing Association).



Audrey Dupont

Assistante ingénieure en recherche et développement de méthodes pour l'évaluation de qualité physiologique des plantes, au laboratoire de germination du GEVES..



Sylvie Ducournau

Ingénieure de recherche, directrice du laboratoire de germination de la SNES (station nationale d'essais de semences) et membre du comité exécutif de l'ISTA ainsi que des comités techniques germination et fleurs.



Références

Benoit L., Imagerie multimodalité appliquée au phénotypage haut-débit des semences et plantules. Thèse de doctorat, École doctorale Sciences et technologies de l'information et mathématiques, 2015 a, Nantes, France.

Benoit L., Belin E., Dürr C., Chapeau-Blondeau F., Demilly D., Ducournau S., Rousseau D. Computer vision under inactinic light for hypocotyl–radicle separation with a generic gravitropism-based criterion., *Computers and Electronics in Agriculture* 111 (2015 b) 12–17.

Benoit L., Rousseau D., Demilly D., Vadaine R., Dürr C. ELONCAM Instrumentation et analyse d'images pour le suivi automatisé individualisé du développement de semences et de plantules. *Les Rencontres du Végétal* 8ème édition, 2015 c, Angers, France.

Demilly D., Ducournau S., Wagner M.-H., Dürr C. Digital imaging of seed germination; Chap. 7, p 147-162. in S. Dutta Gupta, Y. Ibaraki, eds., *Plant Image Analysis: Fundamentals and Applications*, CRC Press 2014.

Ducournau S., Charrier A., Demilly D., Wagner M.-H., Trigui G., Dupont A., Hamdy S., Boudehri-Giresse K., Le Corre L., Landais L., Delanoue A., Charruau A., Henry K., Henry N., Ledroit L., Dürr C. High throughput phenotyping dataset related to seed and seedling traits of sugar beet genotypes. Data in Brief Volume 29, April 2020, 105201.

Huyghe C., Desprez B., Laudinat V., Guillaume D. La betterave sucrière : L'innovation compétitive / Sugar beet: A competitive innovation - 2020 - library.oapen.org.

Delanoue A., Dupont A., Wagner M.-H., Demilly D. and Ducournau S., ISTA 2022 poster session B: "Seedling growth dynamic assessment using image analysis".



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-SA). <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>.

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « NOV'AE », la date de sa publication et son URL.