

## **Analyse de la germination-levée de deux légumineuses (pois - haricot) : intérêts et complémentarités des approches expérimentales et numériques.**

**Raveneau M.P.<sup>1</sup>, Coste F.<sup>1</sup>, Moreau-Valancogne P.<sup>1</sup>, Crozat Y.<sup>1</sup>, Dürr C.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> : Laboratoire d'Ecophysiologie Végétale et Agroécologie (L.E.V.A.), Ecole Supérieure d'Agriculture, 55 Rue Rabelais, BP 30748, 49007 Angers Cedex, France

<sup>2</sup> : INRA, 16 boulevard Lavoisier, 49045 Angers Cedex 01, France

Correspondance : mp.raveneau@groupe-esa.com

### **Résumé**

Les mesures au laboratoire montrent que le pois d'origine tempérée germe à partir de températures très basses ( $< 0^{\circ}\text{C}$ ) mais ne s'allonge qu'au-delà de 2 à  $6^{\circ}\text{C}$  alors que le haricot d'origine tropicale germe et s'allonge à partir de 7 à  $10^{\circ}\text{C}$ . La durée de l'élongation est identique en temps thermique pour les deux espèces. Les pois d'hiver germent plus vite que ceux de printemps avec une température de base identique ; par contre, une des deux variétés d'hiver a une vitesse d'allongement plus lente. Les lots d'un même génotype de pois diffèrent par la température de base d'élongation et/ou les températures optimales de germination. Le modèle SIMPLE permet de simuler correctement la levée au champ sauf dans des situations d'anoxie. L'expérimentation numérique réalisée sur haricot dans trois régions et sur 16 années montre que le modèle rend bien compte des dates de semis pratiquées dans chaque région et permet d'envisager les cas où un semis plus précoce est possible. L'ensemble de ces résultats montre que les conditions environnementales ont un effet prépondérant sur la vitesse et le taux de levée

**Mots-clefs :** *Phaseolus vulgaris* L., *Pisum sativum* L., température de base, élongation, semences, plantules, modélisation

### **Abstract: Analysis of germination-emergence phase in two legumes (pea, bean): Potential and complementarities of experimental and modeling approaches**

Laboratory measurements showed that pea, a temperate legume, germinates from very low temperatures ( $< 0^{\circ}\text{C}$ ) but elongates only beyond 2 to  $6^{\circ}\text{C}$  whereas bean, a tropical legume germinates and elongates from 7 to  $10^{\circ}\text{C}$ . Expressed in thermal time, elongation duration was similar for the two species. Winter pea varieties germinated faster than spring ones but with a similar base temperature; conversely, one winter variety elongated more slowly. Within a given genotype, seed lots differed by their elongation base temperature and/or by their optimal germination temperature. SIMPLE model simulated quite accurately field emergence except under anoxic conditions. Numeric experimentation was implemented in three French areas on 16 years with three bean seed lots. It showed that the model fits well with usual sowing dates in the 3 areas and that an earlier sowing date is possible in some cases. All these results underlined a predominant effect of environmental conditions on emergence rates.

**Keywords:** *Phaseolus vulgaris* L., *Pisum sativum* L., base temperature, elongation, seeds, seedlings, modeling, emergence

## Introduction

En pois protéagineux, l'un des principaux facteurs limitants du rendement est le déficit hydrique pendant le remplissage des grains en juin-juillet. Pour éviter ce déficit, il est possible de décaler le cycle par deux moyens (stratégie d'esquive) : avancer les dates de semis des variétés de printemps de fin février-début mars à janvier voire décembre dans des régions océaniques ou semer des variétés d'hiver à l'automne mais pas trop tôt pour éviter une montaison précoce et donc des dégâts du gel. En haricot de conserve, les industriels recherchent un étalement des dates de récolte afin de valoriser au mieux leur outil de production. Cet étalement est déterminé par la plage de dates de semis possibles dans une région donnée : l'augmentation récente des températures au printemps peut donc constituer une opportunité pour commencer les semis plus tôt.

Cependant, ces modifications de dates de semis peuvent avoir des conséquences sur la réussite de la levée que ce soit en pourcentage ou en vitesse. La dynamique de levée résulte d'interactions entre les caractéristiques des semences et l'environnement dans lequel elles sont placées au sein du lit de semence, environnement qui évolue lui-même au cours de la levée. Les facteurs clefs de l'environnement sont la température, l'humidité et l'état structural du lit de semence. Les réponses des semences à ces facteurs varient entre espèces et génotypes mais aussi entre lots c'est-à-dire selon les conditions de production des semences sur le porte-graines et les processus post-récolte (Moreau-Valancogne et al, 2007) : effet lot et effet génotype doivent donc pouvoir être distingués lors d'études sur la réussite de la levée.

De telles études peuvent être réalisées au champ mais il n'est alors possible de tester qu'une gamme limitée de conditions environnementales. L'utilisation de modèles peut apporter des informations complémentaires en permettant notamment d'explorer une plus large gamme de conditions climatiques. Plusieurs modèles de levée existent ; tous distinguent deux phases, la germination et l'élongation de la plantule et prennent en compte la réponse à la température et au potentiel hydrique du sol (Bouaziz et Bruckler, 1989 a,b,c ; Mullins et al, 1996 ; Finch-Savage et al. 1998). Cependant, après la germination, l'allongement de la plantule dépend également des obstacles mécaniques tels que les mottes ou les croûtes de surface. Le modèle SIMPLE (Dürr et al, 2001) permet de prendre en compte ces états structuraux et la distribution des profondeurs de semis, résultats des travaux réalisés par l'agriculteur.

Au cours de ce travail, nous avons caractérisé les interactions entre l'environnement et les espèces, variétés ou lots de semences afin notamment d'identifier les marges de manœuvre des agriculteurs dans les changements de dates de semis mais aussi de hiérarchiser les variables en jeu pour des études ultérieures. Pour cela, nous avons obtenu par des mesures au laboratoire, les valeurs des paramètres de réponse à la température et au potentiel hydrique des génotypes et lots. Nous avons ensuite testé ces semences au champ et comparé ces résultats avec ceux obtenus par des simulations avec le modèle SIMPLE. Enfin, pour le haricot, nous avons procédé à une expérimentation numérique en simulant la levée de plusieurs lots dans une large gamme de conditions environnementales : trois régions de production, seize années climatiques et huit dates de semis.

## 1. Principes du modèle SIMPLE

Une description complète du modèle SIMPLE est disponible dans Dürr et al. (2001, 2003) ; nous n'en présentons ici que les caractéristiques principales. SIMPLE crée des représentations en 3D du lit de semence en utilisant comme variables d'entrée les tailles, nombres et positions des agrégats. Les semences sont positionnées selon la distribution des profondeurs. La température et le potentiel hydrique de plusieurs sous-couches sont les autres variables d'entrée. Le modèle prédit la germination et la levée de chaque semence à un pas de temps journalier. La durée de germination d'une semence  $i$  est choisie au hasard dans la distribution des temps thermiques du lot de semences utilisé. Depuis le semis, le temps thermique est cumulé au-dessus d'une valeur seuil, la température de base  $T_b$  à

condition que l'humidité du sol à la profondeur de semis soit supérieur au potentiel hydrique de base,  $\psi_b$ .  $T_b$ ,  $\psi_b$  et la distribution des temps thermiques sont des variables d'entrée déterminées au laboratoire. Après la germination, le temps mis pour atteindre la surface est calculé en prenant en compte la profondeur de semis, la longueur du trajet à parcourir au travers des agrégats et les paramètres d'élongation de la tige. Cette durée est calculée en temps thermique en utilisant une  $T_b$  qui peut être différente de la  $T_b$  de germination. La probabilité que la plantule soit bloquée sous un agrégat dépend de la taille des mottes et de leur position à la surface ou dans le lit de semence. Enfin, la probabilité qu'une plantule soit bloquée sous une croûte de surface (croûte de battance) est liée à l'humidité de cette croûte (sèche ou humide) : la formation de cette croûte dépend de la pluie cumulée depuis le semis et de la texture du sol. Les simulations sont ainsi répétées mille fois pour obtenir la dynamique de levée et le pourcentage final.

## **2. Réponses des semences à la température et au potentiel hydrique : variabilité entre espèces, génotypes et lots**

### *2.1. Méthodes de caractérisation au laboratoire*

Pour le haricot, la variété choisie est Booster, variété principale de haricot d'industrie de Vilmorin à cette période. Pour le pois, différents génotypes ont été étudiés avec des variétés de printemps, Baccara et Térése, et des variétés d'hiver, Champagne et Cheyenne. Baccara et Cheyenne sont des variétés assez anciennes mais qui sont les variétés de référence pour de nombreuses études agronomiques et physiologiques. Champagne est un pois fourrager qui a permis le transfert de la tolérance au froid à de nombreuses variétés commerciales de pois d'hiver (Cousin, 1997 ; Lejeune-Hénaut et al, 1999). Térése et Champagne présentent des réponses contrastées au froid au stade jeune plante et sont les parents de populations de lignées recombinantes rendant possible l'analyse de QTL (Dumont et al, 2009). Afin de séparer les effets du génotype de l'effet des conditions environnementales, des productions de semences ont eu lieu sur deux sites, Angers (station expérimentale de la FNAMS) et Mons-en-Chaussée (station expérimentale de l'INRA) et sur deux années, 2006 et 2007.

La germination et l'élongation à l'obscurité ont été mesurées à différentes températures (5 à 33°C pour la germination ; 7 à 25°C pour l'élongation) et à différents potentiels hydriques (0,2, 0,5, 1 et 1,5 MPa). Pour chaque température, la relation entre le pourcentage cumulé de germination et la durée depuis le semis a été ajustée à une fonction de Gompertz ce qui a permis de calculer la vitesse de germination au moment où le pourcentage cumulé atteint 50% ( $1/t_{g50}$ ). Ces vitesses ont été mises en relation avec la température pour décrire la courbe de réponse sur l'ensemble de la gamme étudiée et calculer la température de base. Dans la gamme de températures où la vitesse de germination ( $1/t_{g50}$ ) augmente linéairement, une régression permet de calculer les paramètres de la droite dont la température de base est l'abscisse à l'origine. Cette température de base a été calculée pour chaque répétition de 25 graines de chaque lot. Les valeurs moyennes de chaque lot ont pu alors être comparées par une analyse de variance ( $\alpha = 5\%$ ) et, si nécessaire, par un test de comparaison multiple de moyenne, le test de Newman-Keuls. Pour les lots ne présentant pas de différences significatives, une seule valeur moyenne a été estimée et utilisée pour calculer les temps thermiques. Les temps thermiques pour atteindre 50% de germination ( $Tt50$ ) ont été calculés en ajustant les pourcentages de germination au temps thermique par une fonction de Gompertz dans la gamme de températures où a été établie la relation linéaire. Des calculs similaires ont été effectués pour calculer le potentiel hydrique de base, la température de base d'élongation et le temps thermique pour atteindre 5 cm de long ( $Tt5cm$ ) ; cependant, les fonctions d'élongation ont été ajustées à une fonction de Weibull et non de Gompertz comme dans le cas de la germination. Cette méthodologie et ces calculs sont décrits en détail par Raveneau et al (2011).

## 2.2 Comparaison pois-haricot

Le pois présente un pourcentage de germination élevé proche de 100% à des températures basses (5°C) alors que pour le haricot, le pourcentage de germination peut être affecté à 10°C (Tableau 1). Le pois présente une température de base de germination et une température optimale plus basses ; par contre, il a un temps thermique plus élevé que celui du haricot (Tableau 1). Ces résultats sont à mettre en relation avec l'origine de ces espèces, tempérée pour le pois et tropicale pour le haricot (Young et al, 2003). Pour le potentiel hydrique, les valeurs sont très proches entre les deux espèces. Au niveau de l'élongation, la température de base d'élongation du pois est plus élevée que celle du haricot. De plus, au sein d'une même espèce, les températures de base d'élongation sont plus élevées que celles de la température de base de germination. Ceci a été observé chez d'autres espèces comme le haricot mungo (Fyfield et Gregory, 1989) ou le sorgho (Lawlor et al, 1990). La phase d'élongation sera donc plus pénalisée par les basses températures que la phase de germination. Par contre, le temps thermique moyen pour atteindre une longueur de 5 cm est identique pour les deux espèces malgré une température de base différente (Tableau 1).

**Tableau 1 :** Comparaison des caractéristiques de germination – élongation des deux espèces pois - haricot (Pourcentage final à 5°C pour le pois et 10°C pour le haricot ; Température de base (Tb) ; Temps thermique pour obtenir 50% de graines germées (Tt 50) ; le potentiel hydrique de base  $\Psi_{b50}$  et le Temps thermique pour atteindre une longueur de 5 cm (Tt 5cm)).

|         | Germination |          |           |                    | Elongation |             |
|---------|-------------|----------|-----------|--------------------|------------|-------------|
|         | % 5 ou 10°C | Tb (°C)  | Tt 50(DJ) | $\Psi_{b50}$ (MPa) | Tb (°C)    | Tt 5cm (DJ) |
| Pois    | 96-100      | - 1,1    | 22 - 39   | -1,7 à -2,1        | 2 - 6      | 46          |
| Haricot | 33-100      | 6,5-10,4 | 9 - 15    | -1,7 à -2,5        | 7-10       | 45          |

## 2.3 Comparaison de différents génotypes de pois

La vitesse de germination des pois d'hiver est plus rapide (22-27 DJ) que celle des pois de printemps (33-40 DJ) (Tableau 2). La température de base d'élongation varie plus entre lots qu'entre variétés. Champagne présente un allongement au départ (5 premiers cm) plus lent mais il a une longueur maximale supérieure aux trois autres génotypes. La somme du temps thermique pour obtenir 50% de graines germées et du temps thermique pour obtenir une longueur de 5 cm donne une valeur peu différente entre les quatre génotypes (Tableau 2). Au final, la date de levée pourrait être proche pour ces différents génotypes.

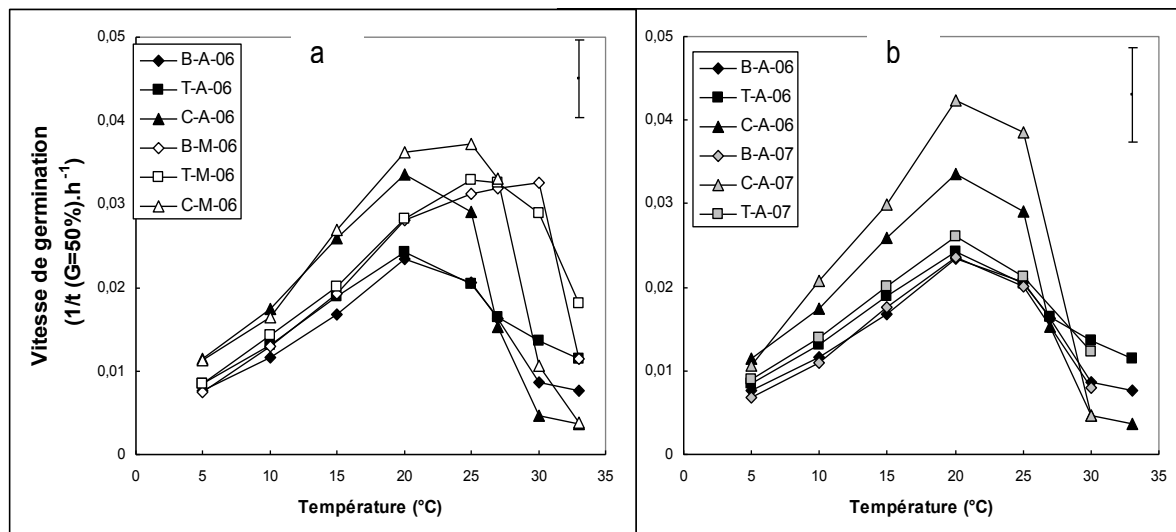
## 2.4 Comparaison de différents lots de pois

La comparaison des lots de différents génotypes de pois (Baccara, B ; Champagne, C ; Térése, T) entre les deux lieux de production, Angers (A) et Mons (M), montre une température de base identique, un décalage vers des températures plus élevées de la température optimale et un temps thermique pour obtenir 50% de graines germées, plus bas pour Champagne (Figure 1). Lors de la production de semences, la température était un peu plus basse et la pluviométrie en fin de cycle plus élevée à Mons qu'à Angers. La comparaison entre années (2006 - 2007) montre une différence de vitesse de germination pour Champagne. L'année 2006 était plus sèche et un peu plus chaude que 2007. Les différences entre lots peuvent donc s'exprimer sur l'ensemble de la courbe de réponse de la germination à la température.

Une même variabilité entre lots est observée pour la germination du haricot et pour les paramètres d'élongation des deux espèces sans que les données soient suffisantes pour mettre en relation ces variations avec les conditions de formation des semences sur le porte graine.

**Tableau 2 :** Comparaison des caractéristiques de germination – élongation et estimation de la levée de trois géotypes de pois (Pourcentage final à 5°C ; Temps thermique pour obtenir 50% de graines germées (Tt 50) ; la température de base d'élongation et le temps thermique pour atteindre une longueur de 5 cm (Tt 5cm).

|           | Germination |            | Elongation |         | Estimation de la levée |
|-----------|-------------|------------|------------|---------|------------------------|
|           | % 5°C       | Tt 50 (DJ) | Tb         | Tt 5cm  | Tt 50 + Tt5cm          |
| Champagne | 96 -100     | 22 - 27    | 2 - 4      | 69 - 50 | 77 - 91                |
| Cheyenne  | 100         | 24         | 5          | 44      | 68                     |
| Térèse    | 99 - 100    | 33 - 36    | 3,4 - 6    | 47 - 31 | 67 - 80                |
| Baccara   | 98 -100     | 35 - 40    | 3,7 - 6    | 43 - 35 | 75 - 78                |



**Figure 1 :** Vitesse de germination des graines de trois géotypes (Baccara, B ; Champagne, C et Térèse, T) a / graines produites sur deux sites en Anjou (A) et à Mons (M) b/ graines produites en Anjou en 2006 (06) et 2007 (07). La barre verticale représente l'écart type moyen.

### 3. Interactions semences-environnement : hiérarchisation par des essais au champ et test du modèle SIMPLE

#### 3.1 Matériels et méthodes

Des expérimentations au champ ont été réalisées en 2007 sur Champagne et Baccara. Les essais ont été mis en place en Anjou (FNAMS) dans un sol de texture argilo-sableuse à trois dates de semis : 13 Mars, 23 Avril et 13 Novembre. Le premier semis a été fait à 3 cm de profondeur moyenne, le deuxième à 5 cm du fait de la faible humidité des premiers centimètres du sol au moment du semis et le troisième semis à 3,5 cm. Pour cette date de semis tardive, un deuxième lot de Baccara récolté mécaniquement a aussi été semé car il présentait des caractéristiques différentes au laboratoire. Un autre essai a été mis en place sur le site de l'INRA à Mons-en-Chaussée (80) dans un sol argilo-limoneux, sensible à la battance. Le semis a été réalisé le 15 Mars, à une date très proche du premier semis d'Angers. Chaque parcelle mesurait 5 x 2,1m et le dispositif expérimental comportait deux blocs randomisés. Les semis ont été réalisés avec un semoir agricole pneumatique de six rangs.

Des mesures ont été effectuées depuis le semis jusqu'à quelques jours après la levée. Certaines mesures permettent de caractériser l'environnement des semences : distribution des mottes par classe de taille à la surface et dans le lit de semence au semis, humidité du sol par tranche de 1 cm entre 0 et 10 cm de profondeur au semis et au cours de la germination, enregistrement de la pluviométrie et des

températures du sol en continu par des thermocouples placés à 3,5 et 10 cm et reliés à une centrale d'acquisition de données. Les autres mesures permettent de caractériser le positionnement des semences, les dynamiques de germination et de levée ainsi que les causes de non levée (absence de germination, pourriture, blocage sous mottes ou sous croûtes).

Les simulations ont été réalisées avec le modèle SIMPLE en couplant deux types d'informations, les caractéristiques des lots de semences issues des mesures de laboratoire, les données sur l'environnement des semences et les profondeurs des semences déterminées au cours des expérimentations. Les distributions simulées des durées et taux de germination et levée ont ensuite été confrontées aux valeurs observées dans les différentes expérimentations. Deux paramètres statistiques ont été utilisés pour caractériser ces ajustements : la racine carrée de la somme des carrés des écarts (RMSE) et le coefficient résiduel de masse (CRM).

### *3.2 Un effet dominant des conditions environnementales et un retard de Baccara*

Les trois dates de semis et les deux lieux ont permis d'explorer une large gamme de conditions environnementales. En Mars, à Mons, la formation d'une croûte de battance a été observée pendant la germination suivie de températures basses pendant l'allongement de l'hypocotyle alors qu'à Angers après un semis en conditions sèches, la pluviométrie et la température ont été favorables sauf un court épisode à 3°C. En Avril, les températures du sol sont restées supérieures à 15°C jusqu'à la levée mais le contact terre-graine était difficile et une forte pluie a créé une croûte qui s'est fissurée à la dessiccation du fait de la texture. Enfin, le semis de Novembre (Automne) a été réalisé dans un sol sec en surface. Pendant la germination, les températures du sol ont chuté de 8 à 3°C pour remonter entre 6 et 8°C pendant la phase d'allongement de l'épicotyle. Cette remontée des températures est due à un épisode de fortes pluviométries avec 48 mm en 5 jours dont 22 mm le même jour. Ces pluies ont conduit à la formation d'une couche de surface compacte et humide, renforcée dans certaines zones par des ruissellements venus des zones au-dessus de l'essai.

Les pourcentages de germination sont toujours voisins de 100%. Les durées de germination varient entre 2 et 4 jours pour les semis de Mars et 6-8 pour le semis de l'automne (Tableau 3). Pour le semis d'Avril, selon les lots, 70 à 90% de la germination a lieu en 4 jours alors que le reste se termine lors du retour de la pluie. Conformément à ce qui est observé au laboratoire, Champagne germe toujours le premier et Baccara le dernier. Sur l'essai de l'automne, le lot de Baccara récolté à la machine germe plus vite que celui récolté manuellement. Sur les essais du printemps, les pourcentages de levée sont très élevés (97-100%). Par contre, sur l'essai de l'automne, ces pourcentages varient de 51 à 100% entre lots et variétés. Ces différences sont à mettre en relation avec l'état d'anoxie dû à la formation d'une couche de surface compacte et humide. Cet effet probable de l'anoxie rejoint l'observation des ingénieurs Arvalis-UNIP qui déconseillent les semis très précoces de pois de printemps ou tardifs de pois d'hiver dans les parcelles limoneuses à faible vitesse de ressuyage dans la région angevine. La levée est de courte durée en Avril du fait des températures alors qu'en Mars et à l'automne, elle démarre entre 13 et 15 jours après le semis pour se terminer entre 19 et 24 jours. Baccara lève toujours après Champagne : la vitesse d'élongation n'est pas suffisante pour rattraper le retard pris à la germination. Enfin, la durée de la levée (10-80%) varie de 3 à 6 jours et ne présente pas de différences significatives entre génotypes.

### *3.3. Evaluation des prévisions du modèle SIMPLE*

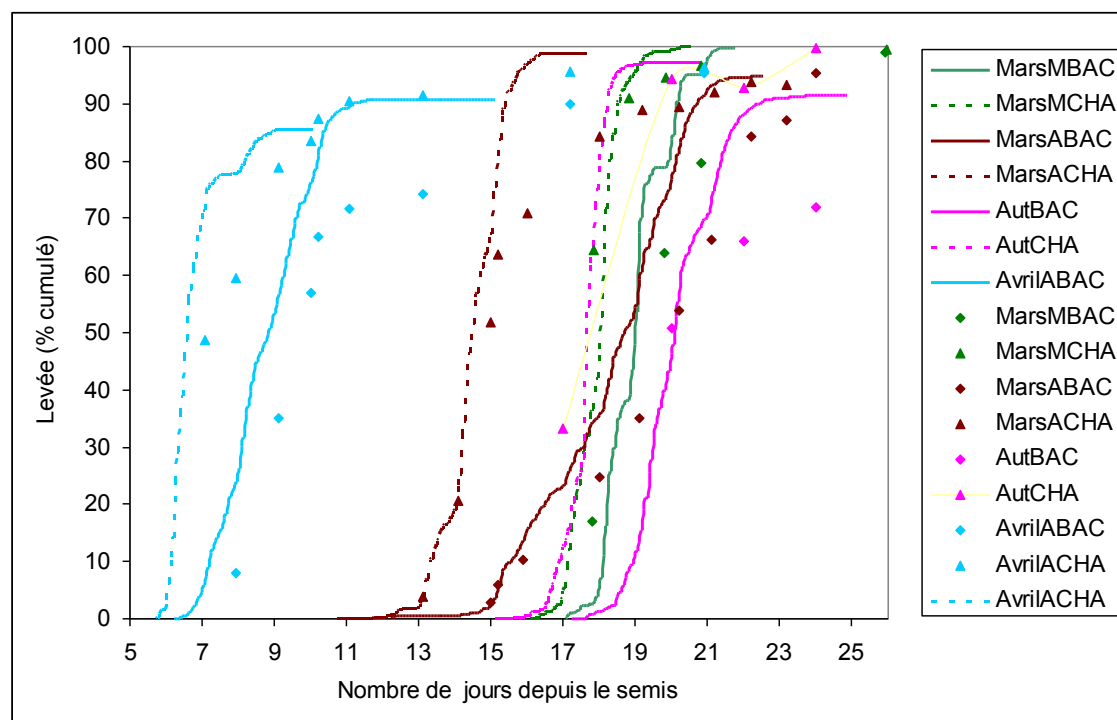
Les résultats des simulations permettent de retrouver l'avance systématique de Champagne (en pointillé) /Baccara (en trait plein) (Figure 2). L'analyse des différentes situations met en évidence un bon ajustement pour le pourcentage de levée et la cinétique de levée sauf pour Baccara quand il y a une fin de levée étalée (essai d'Avril) ou pour le pourcentage de levée dans des conditions d'anoxie pour l'essai d'automne. Des résultats similaires ont été obtenus sur haricot dans des travaux

antérieurs (Moreau-Valancogne et al, 2008) : ceci a donc permis d'utiliser le modèle pour faire de l'expérimentation numérique.

**Tableau 3** : Déroulement de la germination et de la levée dans différents sites (Angers et Mons) et à différentes dates de semis (printemps/automne). *Entre parenthèse, valeur obtenue pour le lot Baccara récolté à la machine.*

| Durées en jours |           | 95% germination | 10% levée | 95% levée   | % levée final |
|-----------------|-----------|-----------------|-----------|-------------|---------------|
| Mars            | Champagne | 2.6 a           | 13.1 a    | 16.6 a      | 97,3          |
| Angers          | Baccara   | 3.3 b           | 16.1 b    | 23.6 c      | 100           |
| Mars            | Champagne | a*              | 15.1 ns   | 19.2 a      | 99,7          |
| Mons            | Baccara   | b               | 16.1 ns   | 21.8 b      | 99,8          |
| Avril           | Champagne | 3.7             | 4.1 a     | 11.3 a      | 97.9          |
| Angers          | Baccara   | 7.4             | 7.5 b     | 18.8 b      | 97            |
| Automne         | Champagne | a*              | 15,3 a    | 21,1        | 100           |
| Angers          | Baccara   | c               | 18 c      | Non atteint | 73 (51)       |

\*Comparaison des % de germination au 3<sup>ème</sup> (Mons) et 6<sup>ème</sup> (Angers) jour après le semis



**Figure 2** : Comparaison des levées entre simulations (courbes) et observations (points) pour les variétés Champagne et Baccara sur les 4 essais. (Mons, M ; Angers, A ; Baccara, BAC ; Champagne, CHA)

#### 4. Expérimentation numérique : quelles dates de semis pour quels lots dans différentes régions de production ?

Dans cette expérimentation, des simulations ont été réalisées pour les trois grandes régions de production de haricot d'industrie (Picardie, Bretagne et Sud-Ouest) sur 16 années (1990-2005 ; base de données météorologiques INRA Agroclim). Pour chaque région, la plage de semis simulée comportait les dates de semis pratiquées par les agriculteurs ainsi que des dates plus précoces pour évaluer leur impact sur le résultat des levées (Tableau 4). Le comportement de trois lots a été simulé. Le lot C1 a été retenu pour ses caractéristiques moyennes parmi la gamme de lots caractérisés au laboratoire :  $T_b$  germination  $6,2^{\circ}\text{C}$ ,  $\psi_b$   $-2$  MPa et  $T_b$  élancement  $8,5^{\circ}\text{C}$ . Les deux autres ont été construits à partir des mesures au laboratoire de façon à obtenir des lots aux caractéristiques très contrastées à basse température et sont donc virtuels : le lot R (Rapide) a une température de base faible pour la germination ( $5^{\circ}\text{C}$ ) et l'allongement ( $7,3^{\circ}\text{C}$ ), et inversement pour le lot L (Lent) ( $8,9^{\circ}\text{C}$  et  $9,2^{\circ}\text{C}$ , respectivement). La réussite de la levée a été évaluée à l'issue des simulations par trois critères : le pourcentage final, la vitesse et l'homogénéité de la levée. La synthèse des résultats des simulations a été faite en identifiant les situations où ces trois critères sont atteints au moins 8 années sur 10 (Tableau 4).

Aux dates de semis habituelles (gris foncé), les trois critères sont remplis par tous les lots sauf à la date la plus précoce dans le Sud-Ouest. Le programme de simulation sur 16 ans permet ainsi de retrouver les plages de dates de semis pratiquées par les agriculteurs. Ceci confirme donc la capacité de SIMPLE à rendre compte de la levée au champ dans une plus large gamme de situations que l'expérimentation et permet d'explorer d'autres situations que celles déjà connues des praticiens. Ainsi, il est possible d'avancer les dates de semis en Bretagne et en Picardie notamment pour le lot R (cases gris-blanc) mais pas dans le Sud-Ouest (Landes). Cette possibilité est peut-être en relation avec l'évolution des températures du fait du changement climatique.

**Tableau 4** : Dates de semis simulées pour lesquelles les critères de levée sont atteints au moins 8 années sur 10 pour les 3 lots de semences (R : Rapide, C1 : moyen, L : Lent)

| Dates de semis simulées | Picardie | Bretagne | Sud-Ouest |
|-------------------------|----------|----------|-----------|
| 1-Avr                   |          |          |           |
| 10-Avr                  |          |          |           |
| 20-Avr                  |          |          | R         |
| 30-Avr                  |          |          | R, C1, L  |
| 10-Mai                  |          |          | R, C1, L  |
| 20-Mai                  |          |          | R, C1, L  |
| 30-Mai                  |          | R        | R, C1, L  |
| 10-Juin                 |          | R, C1    |           |
| 20-Juin                 | R, C1, L | R, C1, L |           |
| 30-Juin                 | R        | R, C1, L |           |
| 10-Juill                | R, C1, L |          |           |
| 20-Juill                | R, C1, L |          |           |

Critères : % levée  $>85\%$  - Nombre de jours semis-levée  $< 13$  - Nombre de jours entre 10 et 80% de levée  $< 4$ .  
Noir : non atteints – Gris : atteints (gris-foncé = dates de semis habituelles)

Le modèle SIMPLE permet de montrer que la phase la plus déterminante de la réussite de la levée du haricot n'est pas la germination mais l'allongement de l'hypocotyle. Cette phase peut être longue du fait des températures basses et/ou de la présence de croûtes. De plus, ces croûtes sont les principales causes de pertes de plantules lors de l'émergence que ce soit dans les expérimentations au champ ou dans le programme de simulation. Le modèle met également en évidence un effet dominant des conditions de milieu sur la réussite de la levée : la variabilité est plus forte entre dates de semis (simulations) ou entre lieux et années (expérimentations) qu'entre lots. Cependant, le lot R ayant la température de base pour l'élongation de l'hypocotyle la plus basse a un petit avantage pour les dates de semis précoces. De même dans les essais, le lot ayant une vitesse d'élongation rapide a un avantage lors de la mise en place d'une croûte sèche. Ce travail serait à prolonger par la caractérisation d'une plus large gamme de lots commerciaux d'une même variété.

## Conclusion

La phase de germination-levée ne fait pas l'objet de travaux de sélection, travaux qui se concentrent sur des variables plus globales telles que le rendement ou la qualité de la récolte ou sur les résistances aux bio-agresseurs. Nos travaux soulignent qu'une sélection orientée vers cette phase reste difficile pour plusieurs raisons. Les conditions environnementales ont un effet prépondérant sur la réussite de la levée alors que les écarts entre géotypes sont beaucoup plus réduits. Pour un même géotype, les conditions de production des semences modifient les paramètres de réponse des lots aux conditions environnementales. D'autre part, au niveau de la pratique agricole, les techniques de culture comme la densité et la profondeur de semis permettent au moins en partie des ajustements aux conditions environnementales et aux caractéristiques des lots de semences. Enfin, les nombreuses interactions possibles entre l'environnement et les semences montrent que ce ne sont pas les mêmes caractéristiques des semences et plantules qui sont en jeu pour la réussite de la levée selon les situations. Ainsi, à basses températures, ce sont la température de base et la vitesse d'élongation qui sont les caractéristiques clefs alors qu'en situations sèches, ce peut être le potentiel hydrique de base de germination ou la modification de la vitesse d'élongation face à une augmentation de la résistance mécanique. Nos travaux ont également mis en évidence des différences de pertes de plantules en situation d'anoxie ou de comportements en présence de croûtes. S'il est possible de mesurer un certain nombre de paramètres de réponse aux conditions environnementales, il est donc difficile de classer des lots de semences par niveaux de qualité intrinsèque. Des tests de laboratoire sont régulièrement pratiqués par les laboratoires des entreprises semencières pour évaluer la qualité d'un lot de semences au-delà du test de faculté germinative utilisé pour les transactions commerciales ; ces tests, appelés tests de vigueur, sont par exemple des tests de détérioration contrôlée ou de conductimétrie. Dans nos travaux, nous avons réalisé ces tests et avons tenté de les mettre en relation avec les paramètres de réponse aux conditions environnementales : nous n'avons obtenu aucune corrélation (données non présentées).

Nos résultats fournissent des données utiles pour des modèles de culture tels que STICS qui couvrent l'ensemble du cycle et ont de nombreuses applications ([www.avignon.inra.fr/agroclim\\_stics](http://www.avignon.inra.fr/agroclim_stics) ; Brisson et al, 1998). Elles sont également utiles pour définir les zones et périodes de culture de ces deux espèces et leurs évolutions possibles en lien avec les changements de climat, comme l'a souligné l'expérimentation numérique. Cependant, le modèle SIMPLE n'est pas transférable en l'état pour un usage plus large dans le domaine agricole : il nécessiterait un couplage rapide avec un modèle permettant de décrire les gradients d'humidité et de température sur toute la profondeur du lit de semence, une formalisation des relations entre la résistance mécanique du sol et l'élongation ainsi qu'une prise en compte de l'effet des maladies cryptogamiques.

Ces travaux se sont poursuivis dans deux directions. D'une part, les différences de réponse au froid observées chez le pois ont conduit à travailler sur indicateurs biochimiques (sucres solubles) et

physiologiques (respiration lors de la reprise du métabolisme) (Raveneau, 2012). Ces indicateurs plus rapides à mesurer que la réponse de la germination à la température pourraient permettre de classer facilement des lots ou des génotypes. D'autre part, dans le cas des cultures associées, la phase de croissance précoce avant la mise en place de la compétition est déterminante des rapports de domination qui s'établissent entre espèces. Or, cette phase de croissance précoce dépend de la phase de levée au travers de la durée de vie sous terre qui conduit à une utilisation plus ou moins poussée des réserves de la semence et l'entrée en compétition dépend de la densité de levée de chaque espèce. Une étude des déterminants de cette croissance précoce et de son impact sur les interactions entre espèces a donc été réalisée sur plusieurs espèces au travers d'une thèse (Fayaud, 2012).

## Références bibliographiques

- Bouaziz A., Bruckler L., 1989a. Modeling of wheat imbibition and germination as influenced by soil physical properties. *Soil Science Society of America Journal* 53, 219-227.
- Bouaziz A., Bruckler L., 1989b. Modeling wheat seedling growth and emergence. I. Seedling growth affected by soil water potential. *Soil Science Society of America Journal* 53, 1831-1838.
- Bouaziz A., Bruckler L., 1989c. Modeling wheat seedling growth and emergence. II. Comparison with field experiments. *Soil Science Society of America Journal* 53, 1838-1846.
- Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M. H., Ruget F., Nicoulaud B., Gate P., Devienne-Barret F., Antonioletti R., Durr C., Richard G., Beaudoin N., Recous S., Tayot X., Plenet D., Cellier P., Machet J. M., Meynard J. M., Delecolle R., 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie* 18, 311-346.
- Cousin R., 1997. Peas (*Pisum sativum* L.) *Field Crops Research* 53, 111-130.
- Dumont E., Fontaine V., Vuylsteker C., Sellier H., Bodèle S., Voedts N., Devaux R., Frise M., Avia K., Hilbert J-L., Bahrman N., Hanocq E., Lejeune-Hénaut I., Delbreil B., 2009. Association of sugar content QTL and PQL with physiological traits relevant to frost damage resistance in pea under field and controlled conditions. *Theoretical and Applied Genetics* 118, 1561-1571.
- Dürr C., Aubertot J.N., Richard G., Dubrulle P., Duval Y., Boiffin J., 2001. SIMPLE: a model for SIMulation of PLant Emergence predicting the effects of soil tillage and sowing operations. *Soil Science Society of America Journal* 65, 414-423.
- Dürr C., Aubertot J.N., Dubrulle P., Richard G., Dorsainvil F., Justes E., Job D., Boiffin J., 2003. SIMPLE (SIMulation of PLant Emergence): a model for predicting crop emergence. In: Nicolas, G., Bradford, K.J., Côme, D., Pritchard, H.W. (Eds.), *The Biology of Seeds. Recent Research Advances*. CABI Publishing, UK, pp. 225-232.
- Fayaud B., 2012. Déterminants de la croissance précoce et impact sur les interactions entre espèces dans les associations de cultures à base de légumineuses. Thèse de doctorat L'UNAM – Université d'Angers.
- Finch-Savage W.E., Steckel J.R.A., Phelps K., 1998. Germination and post germination growth to carrot seedling emergence: predictive threshold models and sources of variation between sowing occasions. *New Phytologist* 139, 505-516.
- Fyfield T.P., Gregory P.J., 1989. Effects of temperature and water potential on germination, radicle elongation and emergence of mungbean. *Journal of Experimental Botany* 40, 667-674.
- Lawlor D.J., Kanemasu E.T., Albrecht W.C. and Johnson D.E., 1990. Seed production environment influence on the base temperature for growth of sorghum genotypes. *Agronomy Journal* 82, 643-647.
- Lejeune-Hénaut I., Bourion V., Etevé G., Cunot E., Delhay K., Desmyter C., 1999. Floral initiation in field-grown forage peas is delayed to a greater extent by short photoperiods, than in other types of European varieties. *Euphytica* 109, 201-211.

Moreau-Valancogne P., Coste F., Dürr C., Crozat Y., 2007. Effects of bean seed desiccation conditions on germination and elongation responses to temperature and water potential. In: Adkins S.W., Navie S.C., Ashmore S., (Eds). *Seeds: Biology, Development and Ecology*. CABI publishing (UK), 35, 333-341.

Moreau-Valancogne P., Coste F., Crozat Y., Dürr C., 2008. Field emergence of bean seed lots: characterisation, modelling and simulation. *European Journal of Agronomy* 28, 309-320.

Mullins C.E., Townend J., Mtakwa P.W., Payne C.A., Cowan G., Simmonds L.P., Daamen C.C., Dunbabin T., Naylor R.E.L., 1996. *EMERGE Users Guide: A Model to Predict Crop Emergence in the Semi-arid Tropics*. Department of Plant and Soil Science, University of Aberdeen, United Kingdom.

Raveneau M.-P., Coste F., Moreau-Valancogne P., Lejeune-Hénaut I., Dürr C., 2011. Pea and bean germination and seedling responses to temperature and water potential. *Seed Science Research* 143, 183-192.

Raveneau M.-P., 2012. Effet des vitesses de dessiccation de la graine et des basses températures sur la germination du pois protéagineux. Thèse de doctorat L'UNAM – Université d'Angers.

Young N.D., Mudge J., Ellis N.T.H., 2003. Legume genomes: more than peas in a pod. *Current Opinion in Plant Biology* 6, 199-204.