



**HAL**  
open science

# Le mildiou de l'artichaut, modèle épidémiologique et moyens de lutte

Marie Cochenec

► **To cite this version:**

Marie Cochenec. Le mildiou de l'artichaut, modèle épidémiologique et moyens de lutte. Sciences agricoles. 2012. dumas-00737664

**HAL Id: dumas-00737664**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00737664v1>**

Submitted on 3 Oct 2012

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



**CFR Angers**  
2, rue André Le Nôtre  
49045 ANGERS Cedex 01  
Tél : 02 41 22 54 54



**CATE**  
Vezendoquet  
29250 ST POL DE LEON  
Tel : 02 98 69 22 80



**Vegenov**  
Penn ar Prat  
29250 ST POL DE LEON  
Tel : 02 98 29 06 44



**Chambre d'Agriculture du Finistère**  
Kergompez  
29250 ST POL DE LEON  
Tel : 02 98 69 17 46

## Mémoire de Fin d'Etudes

### Diplôme d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences Agronomiques, Agroalimentaires, Horticoles et du Paysage

Année universitaire : 2011 – 2012  
Spécialisation ou option : Fruits, Légumes, Alimentation et Marchés

### Le mildiou de l'artichaut, modèle épidémiologique et moyens de lutte

Par : Marie COCHENNEC



**Devant le jury :**  
le : 06/09/2012

Sous la présidence de : Mathilde BRIARD  
Maître de stage : Nicolas MEZENECV  
Enseignant référent : Gerhard BUCK-SORLIN  
Autres membres du jury : Jacky BRECHET

Soutenu à Angers

"Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST".

*Sources des illustrations de la couverture (de gauche à droite) :*  
*Photographie prise à Plouescat le 10/07/12 par Marie Cochenec*  
*Mezencev, 2012*  
*Photographie prise à St Pol de Léon le 16/07/12 par Marie Cochenec*

## Remerciements

---

Ce stage de six mois m'a paru passer très vite. J'ai appris énormément avec toutes les personnes que j'ai côtoyées, et à qui je tiens à adresser mes sincères remerciements.

Tout d'abord, je voudrais remercier les personnes faisant parti du comité de pilotage de mon stage. Vous avez su m'encadrer, tout en me laissant de l'autonomie pour gérer ce projet. Cela m'a permis d'avoir confiance en mon travail.

Je suis reconnaissante envers Nicolas Mezencev, mon maître de stage, qui a su me conseiller et me guider au travers de son modèle MILART de prévisions des risques de mildiou sur artichaut. Avant ce stage, j'appréhendais la modélisation. Grâce à ta pédagogie et à ta patience, j'ai pu aller au-delà de ces difficultés.

Je remercie également Solenn Pérennec pour son dynamisme et sa gentillesse. Tu m'as permis d'approfondir mes connaissances de terrain. Tu m'as fait réellement découvrir le métier de conseiller qui m'a toujours attiré. Je garderais en mémoire tous tes conseils pour la suite de mon projet professionnel.

J'adresse aussi mes remerciements à Claudie Monot pour ta disponibilité et ta bonne humeur. J'avais oublié ce que c'était de travailler en laboratoire. Mais tu as su me transmettre ta rigueur de travail et ta joie de manipuler.

Je remercie également Jean-Michel Collet pour sa sympathie et sa pédagogie. J'ai ainsi pu approfondir mes connaissances sur la production d'artichaut et sur l'expérimentation de plein champ. J'ai vraiment apprécié de travailler une nouvelle fois ensemble.

Par ailleurs, je tiens aussi à remercier mon tuteur, Gerhard Buck-Sorlin, qui a toujours su répondre à toutes mes questions dans de brefs délais. Cela m'a vraiment aidé lors de mon travail.

Enfin, je remercie l'équipe de la chambre d'agriculture du Finistère à Saint Pol de Léon pour leur accueil chaleureux et leur enthousiasme. Mon intégration a ainsi pu être rapide. Je remercie aussi toute l'équipe de Vegenov, très dynamique et toujours là pour me guider. Je suis également reconnaissante envers l'équipe du CATE que j'ai eu la joie de retrouver cette année.

De plus, j'aimerais aussi adresser mes profonds remerciements à toutes les personnes qui, de près ou de loin, m'ont permis de réaliser ce stage dans une bonne ambiance et avec énergie. Je pense notamment aux autres stagiaires des trois structures.

## Table des matières

---

Introduction .....	1
Présentation générale.....	3
1) Le pathosystème <i>Cynara scolymus</i> / <i>Bremia lactucae</i> .....	3
2) Méthodes actuelles de protection .....	8
Amélioration de la protection phytosanitaire contre le mildiou de l'artichaut en Bretagne Nord par le biais du modèle MILART .....	9
1) Les modèles de prévision des risques.....	9
2) Présentation de MILART, modèle pour le mildiou de l'artichaut.....	9
3) Méthodologie utilisée pour l'ajustement des paramètres et la validation de MILART.....	11
4) Résultats et discussions sur l'ajustement et la validation du modèle MILART.....	16
5) Résultats et discussion par rapport à l'inoculum primaire .....	22
Prospection de nouveaux moyens de lutte contre le mildiou de l'artichaut pour la Bretagne Nord.....	23
1) Les stimulateurs de défense des plantes (SDP) .....	24
2) Essais en laboratoire des stimulateurs de défense des plantes (SDP) contre le mildiou de l'artichaut .....	25
3) Essai en plein champ des stimulateurs de défense sélectionnés.....	32
Perspectives.....	36

## **Glossaire**

---

CATE : Comité d'Actions Techniques et Economiques, syndicat professionnel gérant la station régionale d'expérimentation du Nord Finistère à St Pol de Léon (29)

DAR : Délai Avant Récolte

d.d.l. : Degré De Liberté

MILART : MILdiou ARTichaut, modèle de prévisions des risques de mildiou sur l'artichaut

SDP : Stimulateur de Défense des Plantes

SECL : Station Expérimentale de Cultures Légumières à Pleumeur-Gautier (22)

Vegenov : Laboratoire de biotechnologies végétales à St Pol de Léon(29)

## Liste des annexes

---

ANNEXE I : Agencement du programme MILART

ANNEXE II : Localisation des trois stations météorologiques du Finistère utilisées par MILART

ANNEXE III : Stades repères de l'artichaut

ANNEXE IV : Exemple de sortie graphique donnée par MILART

ANNEXE V : Table de corrélation

ANNEXE VI : Exemple des données utilisées pour l'analyse statistique (modalité D1)

ANNEXE VII : Exemple d'une sortie de résultats du logiciel R pour la régression linéaire simple entre  $\Delta\text{OBS}$  et  $\Delta\text{ALERTE}$  de la modalité D1

## Liste des figures

---

Figure 1 : Production mondiale d'artichaut en 2010

Figure 2 : Cycle cultural de l'artichaut

Figure 3 : Parcelles de drageons 'Castel' et 'Violet'

Figure 4 : Parcelle de retours 'Castel'

Figure 5 : Phylogénie du *Bremia lactucae*

Figure 6 : Cycle de développement du *Bremia lactucae* sur la laitue

Figure 7 : Modèle de Güntz et Divoux pour la pomme de terre

Figure 8 : Station météorologique du CATE (station expérimentale du Nord Finistère) à St Pol de Léon

Figure 9 : Récapitulatif des différentes modalités testées pour les quatre paramètres lors des simulations MILART

Figure 10 : Plan d'expérience pour l'essai de conduite avec MILART mis en place au CATE

Figure 11 : Spores de *Bremia lactucae* vues sous microscope ( $\times 100$ ) colorées par 0,2 g/L d'aniline dans de l'acide lactique et du glycérol (3 : 1)

Figure 12 : Aspirateur à spore dans une parcelle de drageons d'artichaut au CATE

Figure 13 : Boîtes de dispersion représentant les données issues de la variable  $\Delta$ ALERTE, notée X.ALERTE dans R, en fonction des différents ajustements de paramètres testés lors des simulations MILART

Figure 14 : Boîtes de dispersion représentant les données issues de la variable  $\Delta$ SP, notée X.SP dans R, en fonction des différents ajustements de paramètres testés lors des simulations MILART

Figure 15 : Régression linéaire entre  $\Delta$ SP, notée X.SP dans R, et  $\Delta$ OBS, notée X.OBS dans R, réalisée pour la modalité H<sub>90%</sub>

Figure 16 : Régressions linéaires simples entre la variable ALERTE et OBS, et entre SP et OBS

Figure 17 : Boîtes de dispersion représentant le pourcentage de surface foliaire touchée (SFT) pour les trois modalités de l'essai de comparaison entre la stratégie conventionnelle de protection contre le mildiou et celle issue de MILART mis en place au CATE

Figure 18 : Résultats de l'ANOVA et du test de Newman-Keuls pour l'essai de comparaison entre la stratégie conventionnelle de protection contre le mildiou et celle issue de MILART

Figure 19 : Résultats du comptage de spores collectées par l'aspirateur mis en parallèle des estimations des indices de sporulation (IS) calculés par le modèle MILART

Figure 20 : Déroulement du protocole expérimental pour les tests effectués en laboratoire

Figure 21 : Mini-serre dans laquelle sont mis en place les plants d'artichaut

Figure 22 : Exemples de symptômes de phytotoxicité observés sur des plants traités

Figure 23 : Niveau de phytotoxicité observé sur les plants d'artichaut en fonction des produits SDP et de leur dose



Figure 24 : Indices moyens de maladie en fonction des produits SDP testés en laboratoire sur des plants d'artichaut inoculés par une souche de *Bremia lactucae* 4 jours après traitement

Figure 25 : Exemples de développement de mildiou sur les plants d'artichaut

Figure 26 : Pourcentage d'efficacité moyenne par rapport à l'eau des produits SDP testés en laboratoire sur des plants d'artichaut inoculés par une souche de *Bremia lactucae* 4 jours après traitement

Figure 27 : Plan d'expérience pour l'essai SDP en plein champ avec cinq modalités répétées trois fois

Figure 28 : Photographie de la parcelle de l'essai en plein champ des SDP située au CATE

Figure 29 : Pourcentage moyen de surface foliaire touchée par le mildiou en fonction des modalités

## Liste des tableaux

---

Tableau 1 : Récapitulatif de l'ensemble des résultats des régressions linéaires exécutées pour comparer les variables ALERTE et SP avec la variable OBS

Tableau 2 : Récapitulatif de l'ensemble des résultats des régressions linéaires exécutées pour comparer les variables  $\Delta$ ALERTE et  $\Delta$ SP avec la variable  $\Delta$ OBS

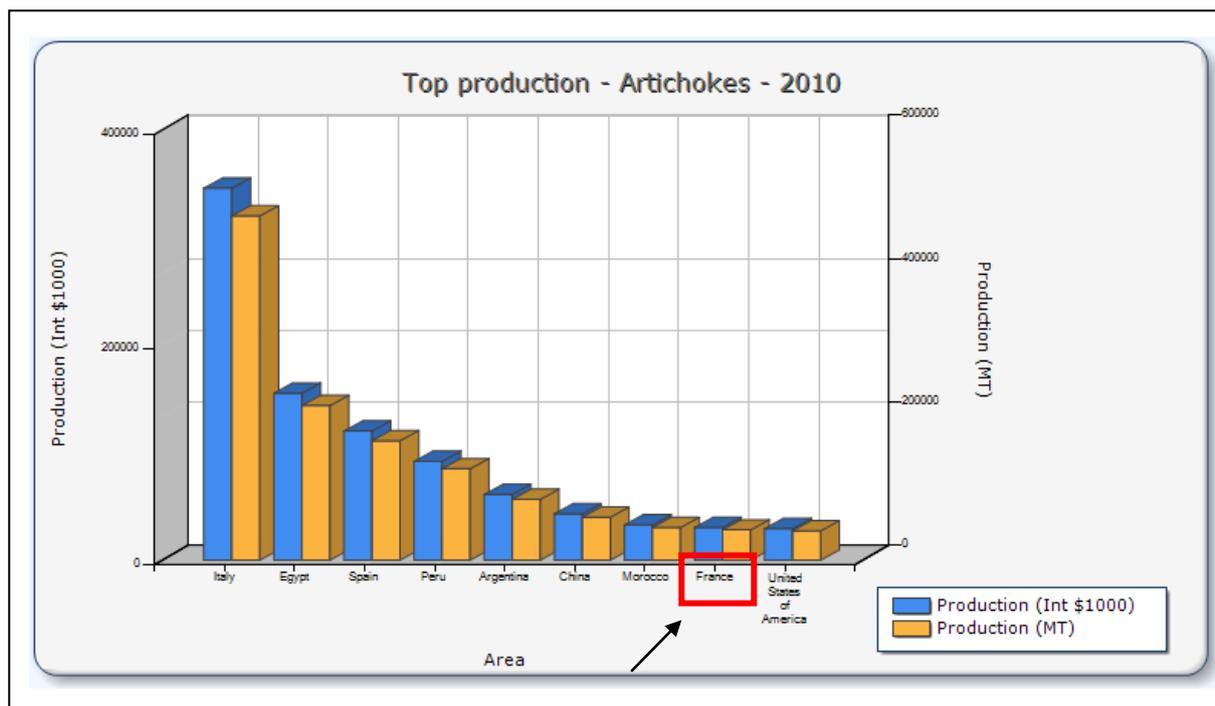
Tableau 3 : Résultats des régressions linéaires simples entre la variable ALERTE et OBS, et entre SP et OBS

Tableau 4 : Récapitulatif des résultats d'indice moyen de maladie de d'efficacité moyenne pour les produits testés en laboratoire

Tableau 5 : Récapitulatif des pourcentages moyens de surface foliaire touchée par le mildiou pour les trois modalités testées en plein champ

## Introduction

L'artichaut représente au niveau mondial une production de 1,4 tonne par an (FAO, 2012). Elle est principalement assurée par l'Union européenne. Etant une plante originaire de Méditerranée, les deux premiers pays producteurs sont naturellement l'Italie (60% du volume européen) et l'Espagne (27%). La France se situe au troisième rang au niveau européen (8<sup>ème</sup> au niveau mondial) (cf. **Figure 1**), en réalisant seulement 7% de ce volume (Serrurier *et al.*, 2010). La Bretagne est le premier bassin de production français en assurant plus de 80% du volume national sur environ 7000 ha (FranceAgrimer, 2010).



**Figure 1 : Production mondiale d'artichaut en 2010** (Source : FAO Stats)

En région Bretagne, le premier problème fongique pour l'artichaut est le mildiou du feuillage et des capitules provoqué par un oomycète, *Bremia lactucae* Regel. Au cours de la culture, les attaques précoces de *B.lactucae* sur le feuillage entraînent des pertes de rendement importantes. D'après des essais menés en 2007 au CATE (station expérimentale du Nord Finistère), en cas d'attaques, ces pertes peuvent atteindre 10 à 20% du rendement potentiel (1,5-2 t/ha) selon les variétés. *B.lactucae* peut aussi infecter les capitules à partir des feuilles contaminées, et provoquer une diminution de la qualité visuelle, soit une baisse de leur valeur marchande (Monot *et al.*, 2011).

Les spécialités actuellement homologuées contre le mildiou de l'artichaut sont peu nombreuses. Il s'agit uniquement de traitements préventifs. Les spécialités contenant du Mancozèbe (dithiocarbamates) ont des délais avant récolte (DAR) très longs (21 jours pour le dithane, et 30 jours pour le RHODAX) à cause de leur mode d'action par contact. Or la période de récolte en artichaut est de 4 à 6 semaines. Si elle est cumulée avec le DAR, le temps de culture sans protection devient trop long. Un autre produit, le COACH PLUS (dimétomorphe & pyraclostrobine), a un DAR de 7 jours, mais sa durée d'efficacité est courte, quelques jours seulement (Ministère de l'Agriculture, 2012).

Pour l'homologation de nouvelles spécialités phytosanitaires, les contraintes sociétales deviennent déterminantes. Les dossiers d'homologation sont de plus en plus longs et coûteux. Les firmes ont donc des difficultés à les rentabiliser sur des cultures peu développées comme l'artichaut. L'adoption du nouveau catalogue des usages fusionnant les usages des cultures 'voisines' (ex. laitue, chicorée et mâche) doit permettre de palier ce problème. Mais les usages artichaut ne seront fusionnés qu'avec le cardon, ce qui n'améliorera pas sa situation du point de vue des produits phytosanitaires disponibles (Mezencev, 2012).

Au niveau français, le plan Ecophyto 2018 a été mis en place en réponse à la demande sociale de consommation de 'produits sains'. Son objectif principal est de réduire de 50% l'utilisation des produits phytosanitaires d'ici 2018, si possible (Ministère de l'Agriculture, 2012). Face à cette réglementation, il devient essentiel de développer de nouvelles stratégies de protection des cultures, et particulièrement pour la culture de l'artichaut mal pourvue au niveau de la protection phytosanitaire.

Les spécificités des conditions climatiques de la Bretagne et de la culture d'artichaut font que *B.lactucae* ne représente, un problème majeur qu'en Bretagne. Le développement de ce pathogène est extrêmement favorisé par le climat océanique de la région (Monot *et al.*, 2011). De plus, la plante est présente toute l'année, sa culture durant 2 à 3 ans. Economiquement, il n'est pas possible de mettre en place une protection systématique durant toute cette période (Pérennec, Mezencev, 2008).

Dans ce contexte, la Chambre d'Agriculture du Finistère (Antenne de Saint Pol de Léon), Vegenov (laboratoire de biotechnologies végétales) et le CATE ont décidé de mettre en commun leurs efforts afin de prospecter de nouvelles stratégies de lutte contre le mildiou de l'artichaut. C'est dans ce cadre que depuis 2007, un modèle de prévisions des risques de mildiou, appelé MILART (MILdiou ARTichaut) a été élaboré. Les validations successives ont permis de préciser certains paramètres du modèle.

En parallèle, des recherches et des essais sont menés sur des produits autres que phytosanitaires, pouvant être intéressants dans la lutte contre le mildiou de l'artichaut (Collet, 2012). L'objectif est de trouver une spécialité efficace contre *B.lactucae* sur artichaut, et ayant un impact faible sur les hommes et l'environnement.

Mon travail fait parti de ce projet dont le fil conducteur est la problématique suivante :  
*La protection phytosanitaire contre le mildiou de l'artichaut peut-elle être améliorée par le biais du modèle MILART et l'utilisation de produits alternatifs ?*

Les objectifs visés par ce travail ont été de :

- évaluer la pertinence du modèle MILART en vu de le rendre accessible aux producteurs via Internet
- tester de nouveaux produits alternatifs ayant une action de stimulation de défense des plantes

Ces deux objectifs correspondent à deux étapes de travail présentées séparément dans ce mémoire. Dans un premier temps, le pathosystème artichaut / mildiou sera présenté ainsi que les méthodes actuelles à la disposition des producteurs. Cette partie fait office de bibliographie. Dans un second temps, le modèle MILART et sa méthode de validation seront détaillés. Cette méthode a consisté à comparer à l'aide de statistiques les données issues d'un réseau de parcelles suivies et les estimations provenant du modèle MILART. Dans un troisième temps, les essais concernant les stimulateurs de défense des plantes seront présentés. Les premiers essais ont été menés en laboratoire pour effectuer une première sélection avant de réaliser des essais en plein champ. Enfin, une conclusion permettra de dégager des futures pistes de travail.

## Présentation générale

### 1) Le pathosystème *Cynara scolymus* / *Bremia lactucae*

#### □ La plante hôte : l'artichaut

- *Taxonomie, biologie et historique de production*

L'artichaut, *Cynara scolymus* L., appartient à la famille des Astéracées. Il s'agit d'une plante en rosette pérenne qui émet une fois par an des fleurs allogames.

Sa production a commencé lors de son introduction en France vers la fin du XV<sup>e</sup> siècle, sans doute par le biais des guerres contre l'Italie. La consommation d'artichaut devient vite la mode chez les nobles, et notamment parce que des bienfaits médicaux lui sont attribués.

Le climat, mais aussi l'organisation de la filière vont influencer le fort développement de cette culture en Bretagne, en particulier dans la région de Saint Pol de Léon. Au début du XX<sup>e</sup> siècle, l'arrivée du chemin de fer va également contribuer à la mise en place de grandes cultures d'artichaut en plein champ (Pitrat *et al.*, 2003).

- *Itinéraire cultural classique de l'artichaut en Bretagne*

La culture d'artichaut est pluriannuelle. Les plantes restent en plein champ entre 2 et 3 ans en moyenne selon les variétés implantées (**cf. Figure 2**) (Pérennec, 2011).

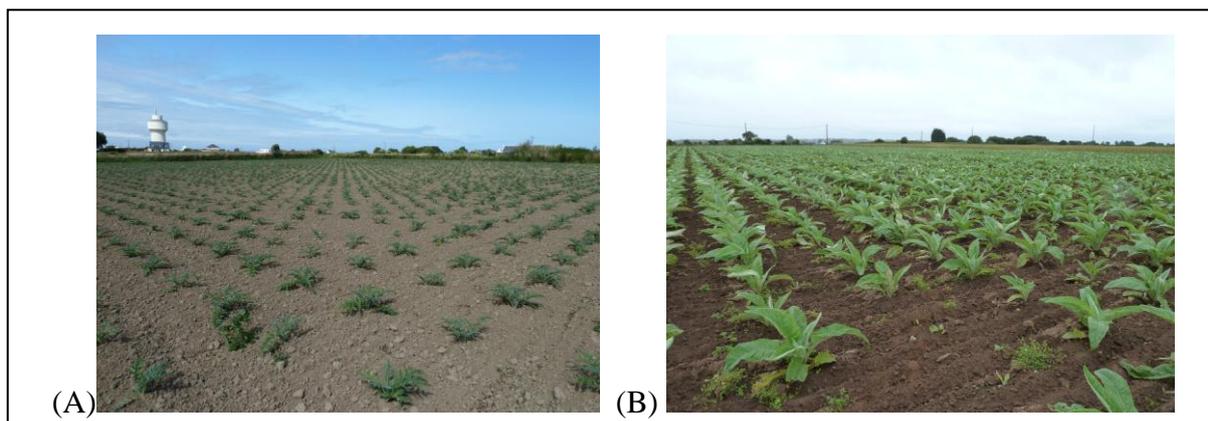
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Dragons Année N			Plantation					Récolte				
Artichauts de 2 ans (retours) Année N+1		Dédrageonnage				Récolte			Broyage		Dédrageonnage	
Artichauts de 3 ans (vieux) Année N+2	Dédrageonnage				Récolte							

**Figure 2 : Cycle cultural de l'artichaut** (Source : Pérennec, 2011)

Avant la plantation, le sol doit être préparé de façon superficielle. Des 'boutures' d'artichauts, appelés 'dragons' (**cf. Figure 3**), sont ensuite plantées en plein champ entre mars et juin de l'année N. Suite à la plantation, le désherbage est essentiel dans les mois qui suivent. Il assure une bonne installation du plant.

Par la suite, il devient moins nécessaire car l'artichaut est une plante volumineuse, étouffant d'elle-même les autres plantes. Le mildiou du feuillage se développe pendant l'été et l'automne, en particulier pendant les stades de montaison. Dans la majorité des exploitations, entre zéro et trois traitements fongicides sont réalisés au début de l'année N pour éviter l'apparition de mildiou.

La récolte, faite manuellement, a lieu entre août et novembre de la même année. Elle est étalée du fait de l'hétérogénéité observée sur une même parcelle. En général, le rendement est de 7 à 10 t/ha. Une fois la récolte réalisée, les artichauts sont broyés avant l'hiver. Cette opération permet à la plante de mieux repartir pour donner plusieurs dragons l'année suivante (Collet, 2012).



**Figure 3 : Parcelles de drageons (A) ‘Castel’ et (B) ‘Violet’** (Prises à Roscoff le 16/07/12 et à Taulé le 03/07/2012 par Marie Cochennec)

En année N+1, soit la seconde année de production (cf. **Figure 4**), un dédrageonnage est réalisé. Ceci consiste à sélectionner un drageon par plant d’artichaut. Les autres drageons, non choisis, seront soit enlevés, soit implantés sur une autre parcelle.

La récolte a lieu beaucoup plus tôt dans l’année. Il s’agit d’une conséquence du repos de la plante durant l’hiver. Cette période lui permet de reconstituer ses réserves nutritionnelles ce qui facilite le redémarrage en année N+1. C’est pourquoi il est plus précoce. Comme la récolte a lieu entre juin et août, le broyage et le second dédrageonnage sont aussi effectués plus tôt dans l’année. Au niveau sanitaire, les artichauts de l’année N+1, appelés « retours » ou « artichauts de 2 ans », évitent ainsi la principale période à risque (fin d’été). Des symptômes peuvent quand même être observés.



**Figure 4 : Parcelle de retours (artichauts de deuxième année) ‘Castel’** (Prise à Plouescat le 10/07/12 par Marie Cochennec)

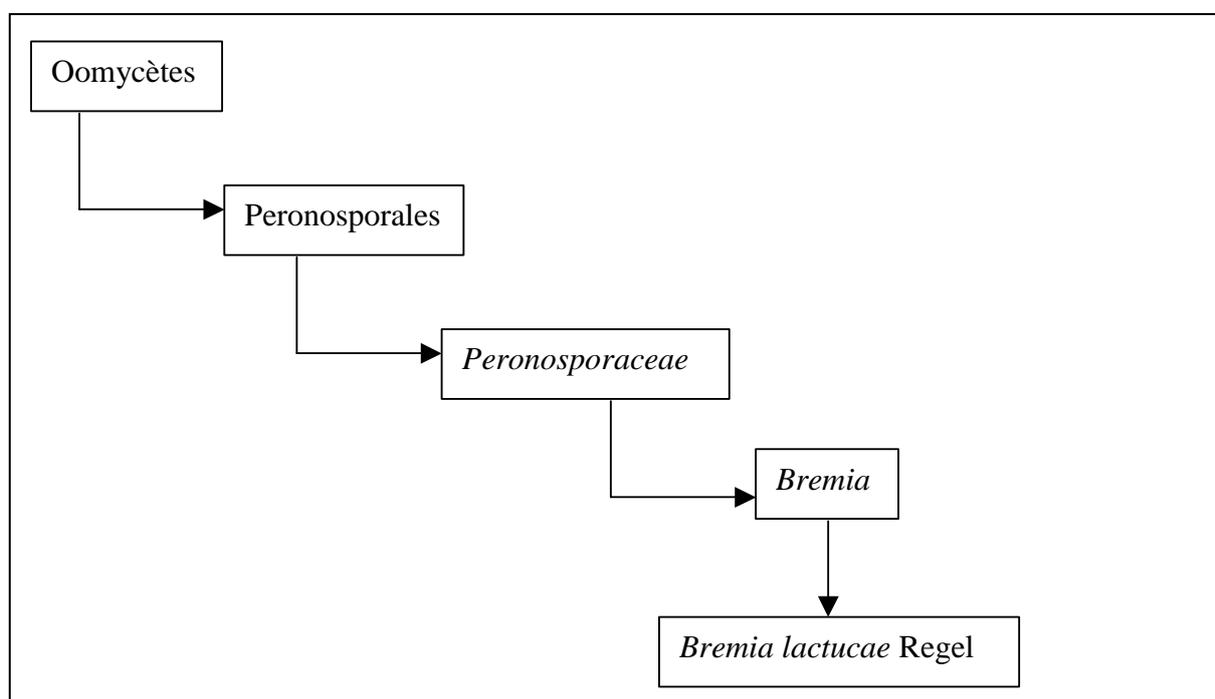
Enfin, quand une troisième année de production est entamée, soit année N+2, la récolte est encore plus précoce qu’en année N+1 pour les raisons expliquées précédemment. Après l’année N+2, la parcelle est souvent détruite car elle devient plus difficile à entretenir (Collet, 2012).

## □ Le pathogène : le mildiou

### ▪ Taxonomie, symptômes

Le mildiou de l'artichaut est connu sous le nom de *Bremia lactucae* Regel. Il appartient à la sous-classe des Oomycètes regroupant plusieurs champignons ayant des formes asexuées souvent très spécialisées vis-à-vis d'un hôte végétal. Leurs formes sexuées sont très stables pour la majeure partie de ces champignons (Smith *et al.*, 1988). *B.lactucae* est classé dans la famille des *Peronosporaceae* qui ne rassemble que des parasites obligatoires (cf. **Figure 5**). Comme tous les autres champignons de cette famille, *B.lactucae* réalise donc tout son cycle de développement dans la plante hôte (Weber *et al.*, 1997).

Des études phylogénétiques ont montré que les mildious seraient proches du genre *Phytophthora*, à tel point que certains recommandent de transférer ce genre dans la famille des *Peronosporaceae* (Göker *et al.*, 2006).



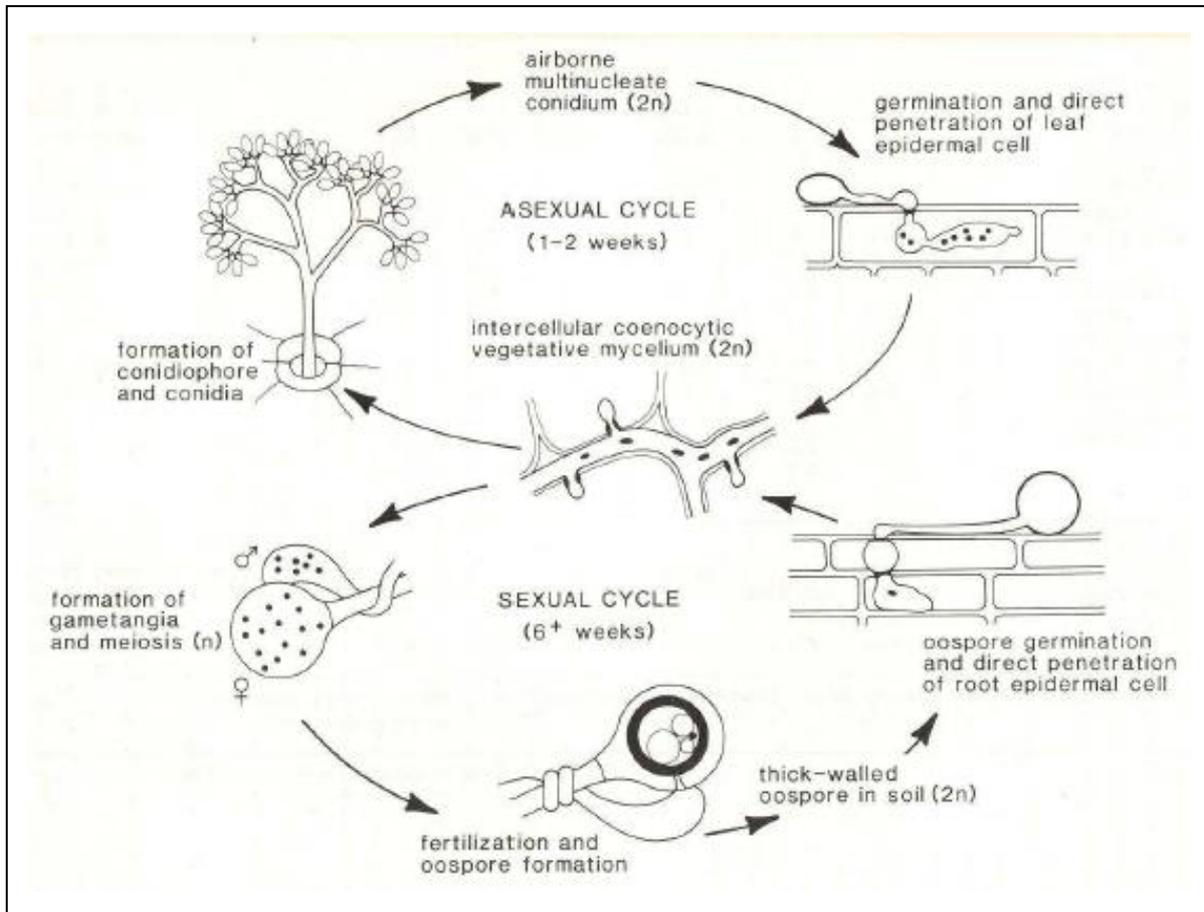
**Figure 5 : Phylogénie du *Bremia lactucae*** (Source : Weber *et al.*, 1997)

*B.lactucae* est présent dans les régions tempérées et sub-tropicales. Il peut infecter 230 espèces d'Astéracées, dont *Lactuca sativa* provoquant le mildiou de la laitue, maladie très étudiée compte-tenu de son importance économique. Au sein même de l'espèce *B.lactucae*, plusieurs formes spécifiques ont été observées (Lebeda *et al.*, 2002). Dans la plupart des cas, ces souches ne peuvent infester que leur hôte d'origine, ou les espèces végétales du même genre. L'interaction hôte/pathogène est donc hautement spécifique ce qui montre la richesse génétique de ce champignon (Janvier *et al.*, 2008). C'est aussi la raison pour laquelle les isolats trouvés sur artichaut ne peuvent pas infecter la laitue, et vice versa (Monot *et al.*, 2006).

Les symptômes provoqués par *B.lactucae* sur artichaut sont caractérisés par des taches vertes ou jaunes pâles au niveau de la face supérieure des feuilles. Ces taches finissent par se nécroser. Des sporulations blanches apparaissent par la suite sur la face inférieure des feuilles (Smith *et al.*, 1988).

▪ *Cycle de développement*

Le cycle de développement de la souche de *B.lactucae* infestant la laitue est assez bien connu (cf. **Figure 6**). Il fournit une base pour comprendre celui de la souche touchant l'artichaut, même si des différences sont très probables (Janvier *et al.*, 2008).



**Figure 6 : Cycle de développement du *Bremia lactucae* sur la laitue** (Source : Clara, 2008)

L'inoculum primaire peut être issu de spores ou de fragments de mycéliums présents sur des plantes avoisinantes. Ils peuvent aussi provenir des débris de la culture précédente (Blancard *et al.*, 2003). La contamination primaire par des oospores sexuées survivant dans le sol, semble assez rare pour les cultures de laitue. Pour l'artichaut, ce point n'a pas été traité dans la littérature (Janvier *et al.*, 2008).

Une fois que l'inoculum de *B.lactucae* arrive en contact avec la plante hôte, il faut une humectation des feuilles de 3h à 15°C minimum pour que les spores germent. La durée prolongée de cette humidité foliaire est un facteur majeur de l'infection (Scherm, Van Bruggen, 1994 ; Wu *et al.*, 2001). Les spores émettent ensuite un tube germinatif (Messiaen *et al.*, 1991). Les mécanismes d'attachement à la surface foliaire et de la germination sont compliqués. Aujourd'hui, ils restent encore méconnus. Un renflement, appelé appressorium, se développe rapidement à l'extrémité du tube germinatif (3h après inoculation). Il est capable de percer la cuticule ce qui va permettre à *B.lactucae* d'infecter les tissus épidermiques. Dans 1 à 5% des cas, le champignon pénètre dans l'hôte par les stomates (Lebeda *et al.*, 2001).

Les hyphes, diploïdes, peuvent alors se développer dans les espaces intercellulaires (Weber *et al.*, 1997). Des haustoria, ou suçoirs, vont se former à l'intérieur des cellules végétales. *B.lactucae* peut se nourrir des contenus de ces cellules grâce à ces haustoria (Lepoivre, 2003).

Il s'avère que la germination et la pénétration de *B.lactucae* dans l'hôte sont réduites par de fortes températures. Mais une fois que ce champignon est installé dans la plante, il peut survivre à de températures élevées (Wu *et al.*, 2002).

*B.lactucae* a alors deux types de reproduction : une forme asexuée, et une autre sexuée.

En conditions climatiques favorables, c'est le cycle asexué qui est privilégié. Il s'agit de la phase parasitaire permettant au champignon de se disperser facilement. L'appareil reproducteur asexué, appelé conidiophore, est diploïde. Dans la majorité des cas, il sort par les stomates. Il porte les conidies qui seront ainsi libérées et dispersées par le vent ou l'eau (Lepoivre, 2003). La dissémination des conidies est favorisée par une brève période sèche en milieu de journée qui provoque une torsion brusque des conidiophores (Messiaen *et al.*, 1991). Les conidies sont en général produites la nuit pour être libérées le matin (Carisse, Pillion, 2002). En effet, il semblerait qu'un début d'exposition à la lumière et une réduction d'humidité relative déclenchent la sporulation (Su *et al.*, 2000). Ceci est cohérent puisque ces conditions correspondent à celles observées aux premières heures après le lever du soleil.

Cependant, il faut noter que la sporulation est inhibée si l'exposition à l'obscurité n'a pas été au minimum de 6 h. Suite à cette étape, un retour à la lumière stoppe le processus de sporulation. La diminution de l'humidité favorise alors le mouvement des conidiophores, et de ce fait, la libération des conidies (Carisse, Pillion, 2002). Les feuilles du sommet de la plante sont les premières à être exposées au soleil. Leur humidité diminue donc plus rapidement. Les spores sont alors libérées et peuvent infecter les feuilles plus basses encore humides ce qui favorise la germination (Scherm, Van Bruggen, 1995).

Les conidies sont responsables des contaminations secondaires (Janvier *et al.*, 2008). Le cycle asexué est très rapide. En conditions optimales, soit 10 à 22°C avec une humidité suffisante au niveau des feuilles, *B.lactucae* met 3 à 4h à infecter la plante hôte. Un cycle asexué dure environ 5 jours dans des conditions climatiques favorables. La succession de ces cycles permet au champignon de progresser très rapidement (Janvier *et al.*, 2008). Les conidies peuvent survivre à la surface de la feuille même si l'air ambiant est sec. En effet, le microclimat à la surface de la feuille, est souvent proche de la saturation (Wu *et al.*, 2000).

Quand les conditions climatiques sont défavorables, le champignon rentre dans le cycle sexué. La reproduction sexuelle est hétérothallique, c'est-à-dire que les gamètes mâles et femelles doivent être issus de thalles différents (Weber *et al.*, 1997). Les organes reproducteurs sont haploïdes (Lepoivre, 2003). Cette reproduction donne des oospores, spores de conservation pouvant survivre jusqu'à 12 mois (Weber *et al.*, 1997). Elles permettent à la souche de *B.lactucae* infectant la laitue de passer l'hiver.

Dans le cas de l'artichaut, la culture est présente 3 années de suite. *B.lactucae* peut donc se conserver sous forme de mycélium dans la plante en saison hivernale. Les drageons plantés peuvent donc être infectés par des cultures d'artichaut de 2 ou 3 ans qui sont situées à proximité.

## 2) Méthodes actuelles de protection

### □ Variétés tolérantes au *Bremia lactucae*

Actuellement, la résistance au mildiou est l'axe prioritaire du programme de création variétale en artichaut en Bretagne (Menard, 2007). Seulement 13 variétés d'artichaut sont inscrites dans le catalogue officiel français, alors que l'Italie en compte au moins 58 (GEVES, 2012 ; Pitrat *et al.*, 2003).

En Bretagne, les producteurs utilisent essentiellement trois variétés : le 'Camus de Bretagne', le 'Castel' et le 'petit Violet' (Pérennec, 2011). Certaines d'entre-elles ont des tolérances vis-à-vis du mildiou. Par exemple, il est admis que le Camus de Bretagne et le petit Violet sont moins sensibles au mildiou que le Castel. Des croisements entre le Camus et le cardon sont d'ailleurs envisagés dans l'espoir de développer des variétés d'artichaut plus tolérantes (Monot *et al.*, 2006).

### □ Autres techniques de lutte contre le mildiou de l'artichaut

Dans un premier temps, des mesures prophylactiques peuvent être prises. L'humidité des feuilles a une influence plus importante sur le développement du mildiou de l'artichaut que l'hygrométrie de l'air (Monot *et al.*, 2006). Il convient donc de bien localiser sa parcelle en évitant celles qui sont humides. Il faut également éviter de surfertiliser pour limiter un développement trop vigoureux des plants qui mettraient alors plus de temps à sécher. Par ailleurs, il est conseillé de désherber sa parcelle pour limiter l'humidité autour des plants d'artichaut (Mezencev, 2012).

Concernant la protection phytosanitaire, trois produits préventifs existent, dont un seul est réellement efficace. Il s'agit du RHODAX (44% de foséthyl-al + 26% de mancozèbe) (Ministère de l'agriculture, 2012) dont l'efficacité semble liée aux phosphonates ayant une action systémique qui permet de protéger l'ensemble de la plante (Pérennec, 2011).

Si la prévention n'a pas été suffisante, il devient difficile, voire impossible de mettre en place une lutte curative contre le mildiou à cause de sa rapidité de développement. Etant donné que le nombre d'applications de produits phytosanitaires est limité, il est primordial de bien savoir positionner les traitements préventifs au cours du cycle cultural de l'artichaut. Ceci est d'autant plus difficile qu'il s'agit d'une culture pluriannuelle et que *B.lactucae* est omniprésent en Bretagne (Monot *et al.*, 2011).

### □ Limites de ces méthodes

Les méthodes utilisées pour lutter contre le mildiou de l'artichaut ne sont pas optimisées. Les traitements phytosanitaires sont systématiques pour éviter toutes pertes économiques engendrées par *B.lactucae*. Leur positionnement peut être amélioré si le risque d'avoir un développement de mildiou est connu.

# **Amélioration de la protection phytosanitaire contre le mildiou de l'artichaut en Bretagne Nord par le biais du modèle MILART**

## 1) Les modèles de prévision des risques

### □ **Définition d'un modèle**

Un modèle est une simplification de la représentation de la réalité (Tchervenivanova, 1995). Il tente d'expliquer le fonctionnement d'un système au travers d'équations mathématiques qui mettent en relation les éléments entrants et sortants du système (Rouzet, Larguier, 1997).

Tous les éléments ne peuvent pas être considérés par le modèle, et seuls les paramètres sélectionnés entrent en ligne de compte. Les autres sont inconnus ou peu importants. Il constitue un 'bruit de fond' (Buck-Sorlin, 2012), c'est-à-dire qu'ils sont impliqués dans la marge d'erreur du modèle.

Lors de la conception d'un modèle, l'étape essentielle reste sa validation. Pour aboutir à celle-ci, l'étape intermédiaire indispensable est l'ajustement des paramètres du modèle. Pour les modèles utilisés en 'outils d'aide à la décision', cette validation doit être à la fois technique et fonctionnelle (Rouzet, 2008). En effet, ce type de modèles doit être au plus proche de la réalité (validation technique), tout en restant facilement utilisable par les techniciens et les agriculteurs (validation fonctionnelle).

En épidémiologie, les modèles sont construits à partir des éléments clés du développement du pathogène et de l'interaction hôte-pathogène. Ainsi, pour les champignons parasites de plantes, la durée d'humidité est par exemple souvent primordiale, car elle conditionne la germination des spores et la pénétration du pathogène dans l'hôte (Van Maanen, 2003). En conséquence, pour les modèles épidémiologiques, il est donc essentiel d'intégrer des paramètres météorologiques au niveau des données entrantes du système pour prévoir les risques d'infection.

### □ **Intérêts et limites des modèles en protection des plantes**

Aujourd'hui, les pressions réglementaires obligent une évolution vers des techniques raisonnées de protection des plantes demandant moins d'intrants. La modélisation permet de mieux gérer le positionnement des traitements phytosanitaires en fonction des risques réels (Monot *et al.*, 2011).

Mais les modèles ont aussi des limites qu'il faut prendre en compte. Comme ils sont des approximations de la réalité, ils doivent constamment être mis en parallèle de données observées sur le terrain. Ils sont complémentaires avec ce que peut constater un agriculteur ou un technicien sur les parcelles (Rouzet, Pueyo, 2006).

## 2) Présentation de MILART, modèle pour le mildiou de l'artichaut

### □ **Objectifs de ce modèle**

Le principal objectif du modèle MILART est d'améliorer l'efficacité des traitements phytosanitaires en prenant en compte le climat, la sensibilité variétale au mildiou et les

pratiques agricoles (Mezencev, 2008). Le modèle sera utilisable par les agriculteurs via une plate-forme Internet.

**Estimation de la gravité des contaminations** pour une période où l'hygrométrie égale ou dépasse 'H%seuil' en fonction de la température moyenne de cette période :

'H%seuil' est à 90% pour que les sporulations soient possibles

T°C	Gravité de la sporulation			
	Légère	Moyenne	Grave	Très grave
7	16h30	19h30	22h30	25h30
8	16h	19h00	22h00	25h00
9	15h30	18h30	21h30	24h30
10	15h	18h00	21h00	24h00
11	14h	17h30	20h30	23h30
12	13h30	17h00	19h30	22h30
13	13h	16h00	19h00	21h30
14	11h30	15h00	18h00	21h00
15	10h45	14h00	17h00	20h00
16	10h00	13h00	16h00	19h00
17	9h15	12h00	15h00	18h00
18	8h30	11h00	14h00	17h00

**Estimation de l'incubation** en fonction de la température : il faut **7 unités** d'incubation pour faire une incubation complète

T°C	Nombre d'Unités d'Incubation
< 8	0,00
8 – 12	0,75
12 – 16,5	1,00
16,5 – 20	1,50
> 20	1,00
> 30	0,00

**Estimation de la survie des spores** : Temps d'exposition à l'air sec

Très bonne	Bonne	Moyenne	Faible
2 – 4h	5 – 8h	9 – 12h	> 12h

Prise en compte des conditions climatiques dans la survie des spores dans un air sec (H%<80%)

**Avis de traitement :**

- Après **3 cumuls d'UI > 7** succédant à une contamination grave (niveau 3) ou très grave (niveau 4)
- Avertissement donné au 3<sup>ème</sup> cumul pour un niveau situé entre 5,5 et 6 UI

**Influence de l'irrigation** (Dose, heure d'arrêt de l'arrosage) pris en compte dans les estimations

**Influence variétale et phénologique** pris en compte dans les estimations

**Influence des traitements** (curatifs/préventifs, persistance, lessivabilité) :

- Agit sur la date de démarrage de la simulation
- En cas de traitements successifs, on tient compte du traitement directeur pour estimer la protection

**Figure 7 : Modèle de Güntz et Divoux pour la pomme de terre** (Source : Divoux, 1963)

## □ Fonctionnement de MILART

Le modèle MILART est fondé sur des expérimentations menées en laboratoire et sur le terrain. Faute de connaissances biologiques, il a été considéré que le mildiou de l'artichaut a un cycle de développement proche de celui des autres mildious, comme celui de la laitue par exemple (Mezencev, 2008). Il existe quelques modèles qui ont été élaborés pour le mildiou de la laitue, que ce soit en Europe ou aux USA (Kushalappa, 2001). Cependant, les cycles culturels sont trop différents entre la laitue et l'artichaut (Monot *et al.*, 2011).

MILART a donc été basé sur les tables de Güntz et Divoux (cf. **Figure 7**) conçues pour le mildiou de la pomme de terre (Divoux, 1963). Divers modèles sur ce mildiou ont été élaborés et validés montrant ainsi leur efficacité pour gérer cette maladie sur pomme de terre. Les tables de Güntz et Divoux estiment les risques de sporulation du mildiou de la pomme de terre en fonction de la température pour une durée d'humidité relative définie au moins égale à 90% (Divoux, 1963). Il se trouve que pour le mildiou de la laitue, l'humidité relative supérieure à 90% favorise aussi fortement la sporulation (Su *et al.*, 2004). Pour le mildiou de l'artichaut, la sporulation doit sans doute avoir les mêmes conditions favorables d'humidité autour de 80-90%.

Le modèle MILART utilise (Mezencev, 2008) :

- les données climatiques horaires collectées quotidiennement par plusieurs stations météo via un téléphone GSM.
- les paramètres biologiques établis par les tables de Güntz et Divoux
- les données propres à chaque parcelle entrées directement par l'utilisateur (date de plantation, variété concernée, stade de la culture, opérations techniques, irrigation).

Grâce à toutes ces données (cf. **Annexe I**), MILART peut estimer l'importance des risques d'apparition du mildiou sur l'artichaut (Mezencev *et al.* 2011).

Pour que les symptômes de mildiou soient visibles, il est considéré que *B.lactucae* doit effectuer 3 cycles continus (Lepoivre, 2003). Le modèle MILART a donc été calibré pour donner une alerte au bout de 2 cycles  $\frac{3}{4}$ . Ceci laisse ainsi le temps aux agriculteurs d'appliquer un traitement phytosanitaire.

Un cycle résulte du cumul de 7 unités d'incubation (UI). Le calcul d'une unité est basé sur la température moyenne journalière. Ceci permet d'avoir une estimation de la durée d'incubation. Ces unités sont donc en jours et dépendent de la température moyenne. Arriver à 7 UI, c'est la sporulation qui intervient (Duvauchelle, 1992).

Le modèle MILART simule entre deux cycles la survie des spores dans une atmosphère d'hygrométrie inférieure à 80%. Ceci permet de savoir si 2 cycles de sporulation/incubation peuvent se succéder (Rapilly, 1991).

Le modèle MILART prend en compte les opérations culturales, et notamment les traitements effectués dans la culture d'artichaut. Le temps d'efficacité supposé des traitements est pris en compte. L'irrigation et les pluies permettent aussi d'évaluer le lessivage de produits phytosanitaires de contact. Ceci peut entraîner la nullité du traitement effectué (Monot *et al.*, 2011).

### 3) Méthodologie utilisée pour l'ajustement des paramètres et la validation de MILART

#### □ Le réseau de stations météo

Le modèle MILART utilise des données climatiques horaires provenant d'une station météorologique (notée CATE-St-Pol) consultée par téléphone GSM (cf. **Figure 8**). Cette station est située à Saint Pol de Léon, au niveau du CATE. Il est important de ne pas travailler avec des moyennes journalières au niveau des données météorologiques sans en connaître les variations. En effet, les moyennes de températures ne sont pas corrélées aux moyennes de développement des pathogènes. Ainsi, par exemple, les développements d'un pathogène à des températures fluctuantes et constantes sont différents (Scherf, 1994).



**Figure 8 : Station météorologique du CATE (station expérimentale du Nord Finistère) à St Pol de Léon** (Prise à St Pol de Léon le 16/07/12 par Marie Cochenec)

Depuis cette année, trois autres stations météorologiques ont été ajoutées à MILART afin d'étendre la zone d'application du modèle. L'une est située sur la commune de Plounevez-Lochrist, notée Plounevez-Lochrist, l'autre sur la commune de Saint Jean du Doigt, notée Tregor (cf. **Annexe II**). La troisième se trouve dans les Côtes d'Armor au niveau de la station expérimentale de cultures légumières (SECL) à Pleumeur-Gautier.

Les données horaires exploitées par le modèle sont la température, la pluviométrie, et l'humidité relative.

### Incubation

Trois modalités :  $U_1, U_2, U_3$

Température	$U_1$	$U_2$	$U_3$
8°C	0	0	0,3
12,1°C	0,6	0,4	0,7
16,6°C	1,8	2,5	1,8
20,1°C	1,5	1	1,1

Les valeurs attribuées à chaque température sont des coefficients entrant dans le calcul des unités d'incubation en fonction des températures enregistrées par les stations météorologiques.

### Sporulation

Trois modalités :  $H_{85\%}, H_{90\%}, H_{95\%}$

Il s'agit ici de modifier le seuil d'humidité relative déclenchant la sporulation

$H_{85\%}$  = humidité relative à 85%

$H_{90\%}$  = humidité relative à 90%

$H_{95\%}$  = humidité relative à 95%

### Durée de survie des spores

Trois modalités :  $D_1, D_2, D_3$

$D_1$	$D_2$	$D_3$
1	1	4
8	4	16
16	8	32
24	12	48

Temps de survie des spores (en heures) dans une atmosphère d'hygrométrie inférieure à 80% (permet de savoir si 2 cycles d'incubation peuvent se succéder)

### Sensibilité variétale et phénologique

Deux modalités : 'Super Sensible' (SS) et 'Super Résistant' (SR)

Stades phénologiques	IS-O	IS-AB	IS-CM	IS-Capitule
'Super Sensible' SS	4	4	4	4
'Super Résistant' SR	1	1	1	1

Les valeurs correspondent à des coefficients de sensibilité attribués par variété et par stade phénologique de l'artichaut : (cf. **Annexe III**)

- stade O: la tête de l'artichaut n'est pas visible
- stade AB: la tête mère est formée et commence à sortir du feuillage
- stade CM: les ailerons sont apparents et commencent à dépasser la tête mère
- stade Capitule : stade de récolte

**Figure 9 : Récapitulatif des différentes modalités testées pour les quatre paramètres lors des simulations MILART (Source personnelle)**

### □ Le réseau de parcelles suivies pour le mildiou depuis 2008

De 2008 à 2011, le modèle a suivi un protocole de validation. Il s'agissait de suivre l'évolution de l'épidémie de mildiou au sein d'un réseau de 10 à 12 parcelles mises à disposition chaque année par les producteurs. Ces parcelles étaient dans des secteurs proches des stations météorologiques. Les données observées sur le terrain ont été conservées dans une base de données pour être confrontés aux résultats estimés par le modèle.

Par construction, le modèle original de Güntz et Divoux, pour le mildiou de la pomme de terre, cumule 7 unités d'incubation pour achever le cycle de la maladie. Afin de préciser le modèle MILART, il a été choisi de faire varier les paramètres (cf. **Figure 9**) comme suit :

- pour l'incubation : 3 modalités (notées  $UI_1$ ,  $UI_2$  et  $UI_3$ ) ont été testées
- pour les sporulations : il s'agit de continuer la grille de Güntz et Divoux modifiée en 2007 suite aux essais menés en conditions contrôlées à Vegenov (laboratoire de biotechnologies végétales). Aucune nouvelle hypothèse n'a été testée en 2012 sur cet aspect. Seuls les hygrométries seuils de sporulation ont fait l'objet de test avec 3 modalités (notées  $H_{85\%}$ ,  $H_{90\%}$ , et  $H_{95\%}$ )
- pour la durée de vie des spores : 3 modalités (notées D1, D2 et D3)
- pour la sensibilité variétale : un coefficient de 1 (tolérant) à 4 (sensible) a été empiriquement choisi pour représenter la sensibilité des variétés aux stades phénologiques successifs de l'artichaut (cf. **Annexe III**). 2 modalités ont été testées (notées SS 'Super Sensible' et SR 'Super Résistante').

Le choix des valeurs de paramétrage pour chacune des modalités a été effectué en relation avec la bibliographie sur le cycle de développement des mildious.

$UI_1$ ,  $H_{85\%}$ , D1 sont les modalités de base qui sont actuellement utilisées dans le modèle MILART. Concernant la sensibilité variétale et phénologique, elle est dépendante des situations propres à chaque producteur.

Aucun traitement contre le mildiou n'a été pris en compte lors des simulations, notamment parce que cette information n'était pas toujours disponible.

Pour chaque simulation, le modèle MILART donne un graphique (cf. **Annexe IV**) représentant les indices de sporulation (histogramme) et le cumul des unités d'incubation (courbe) en fonction du temps. Le modèle émet également une date d'alerte correspondant à la date à partir de laquelle il y a un risque d'apparitions de mildiou dans la culture d'artichaut.

Deux variables ont été choisies pour étudier l'ajustement des paramètres du modèle :

- la date d'alerte émise par MILART, notée « ALERTE »,
- et la date de première sporulation calculée par MILART, notée « SP ».

Ces deux dates ont été comparées avec la date de première apparition des symptômes observée sur le terrain, notée « OBS ».

Des analyses statistiques ont ensuite été réalisées avec le logiciel R. Au préalable, une description statistique des données a permis de repérer les données suspectes et influentes. Elles ont toutes été retirées du jeu de données avant de faire les tests statistiques. C'est pourquoi la taille des échantillons est différente pour chaque modalité. Des régressions linéaires simples et des analyses de la variance ont ensuite été calculées entre les variables OBS et ALERTE, puis entre les variables OBS et SP en passant les dates en format numérique.

Pour interpréter les résultats, le coefficient de corrélation  $r$  et la probabilité critique (p-valeur) de la table de variance (ANOVA) ont été retenus. La valeur du coefficient de corrélation a été comparée à la valeur  $r^*$  donnée par la table du coefficient de corrélation (cf. **Annexe V**) pour une probabilité de  $\alpha = 0,05$  et en fonction du degré de liberté (d.d.l.). Si  $r > r^*$ , alors le modèle est pertinent pour la modalité testée.

Pour la p-valeur de la table de variance, l'hypothèse  $H_0$  est la suivante :  $H_0 : b_1 = b_2 = 0$  ( $b_1$  et  $b_2$  étant les estimateurs du modèle linéaire). Cette hypothèse revient à se demander si  $y$  est indépendant de  $x$ . La p-valeur nous renseigne donc sur l'importance de la liaison entre l'observé ( $x$ ) et l'estimation de MILART ( $y$ ) pour chaque modalité. Si elle est inférieure à la probabilité  $\alpha = 0,05$ , l'hypothèse  $H_0$  est rejetée, soit  $b_1 \neq b_2 \neq 0$  ce qui signifie que  $y$  dépend de  $x$ .

Ces résultats n'ont pas apporté assez de précisions. Les variables ont donc été transformées pour s'affranchir de l'effet annuel dans les calculs. Pour chacune des variables, le nombre de jours entre le 1<sup>er</sup> Janvier de l'année et la date mesurée a été calculé. Voici comment elles ont été notées :

$$\begin{aligned} \text{OBS} \rightarrow \Delta\text{OBS} &= \boxed{\text{Date de première apparition des symptômes de mildiou au CHAMP de l'année N}} - \boxed{1^{\text{er}} \text{ Janvier de l'année N}} \\ \text{ALERTE} \rightarrow \Delta\text{ALERTE} &= \boxed{\text{Date d'alerte émise par MILART pour l'année N}} - \boxed{1^{\text{er}} \text{ Janvier de l'année N}} \\ \text{SP} \rightarrow \Delta\text{SP} &= \boxed{\text{Date de première sporulation du mildiou donnée par MILART pour l'année N}} - \boxed{1^{\text{er}} \text{ Janvier de l'année N}} \end{aligned}$$

De même que précédemment, les valeurs suspectes et influentes ont été supprimées suite à une description de l'ensemble des données recalculées (cf. **Annexe VI**). Des régressions linéaires simples ont également été effectuées avec ces variables modifiées ( $\Delta\text{OBS}$ ,  $\Delta\text{ALERTE}$  et  $\Delta\text{SP}$ ). Des tests ANOVA ont aussi été utilisés afin de connaître les liaisons significatives (cf. **Annexe VII**). La même méthode d'interprétation que précédemment a été utilisée.

Ces derniers résultats obtenus à partir des données recueillies sur 4 ans ont permis d'ajuster le modèle. MILART a alors pu suivre un protocole de validation avec les données 2012. Comme pour les autres années, un réseau de 12 parcelles de drageons a été mis en place (5 en Castel, 3 en Camus et 4 en Violet). Les dates d'apparition de symptômes de mildiou observées sur le terrain ont été comparées avec les dates d'alerte (notée ALERTE) et de première sporulation (notée SP) estimées par le modèle. Les traitements effectués sur les parcelles suivies ont toujours été pris en compte dans les simulations.

Une régression linéaire simple a été effectuée avec l'ensemble des données disponibles pour évaluer la pertinence du modèle. Les méthodes d'interprétation des coefficients de corrélation  $r$  et des probabilités critiques de la table de variance (ANOVA) sont les mêmes que celles utilisées pour l'ajustement du modèle.

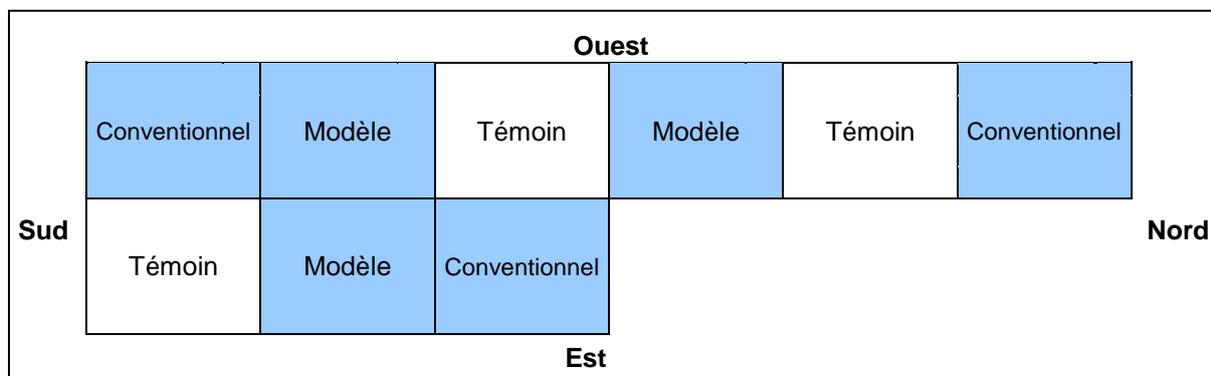
En plus, du réseau de parcelles suivies pour la validation de MILART, un essai a été mis en place au CATE pour comparer la stratégie de traitement proposé par MILART avec une stratégie plus conventionnelle. L'essai a été placé dans une parcelle ayant eu de l'avoine comme précédent cultural. Avant la plantation des drageons, une fertilisation de 30 tonnes/ha de fumier de bovins a été apportée. Les drageons de la variété 'Camus de Bretagne' ont ensuite été plantés le 03/04/2012 avec une densité de 10 000 pieds par hectare. Un désherbage chimique a été effectué le 11/04/2012 avec de l'EMIR (oxyfluorène + propyzamide) à 1,4 L/ha.

L'essai comporte trois modalités répétées trois fois :

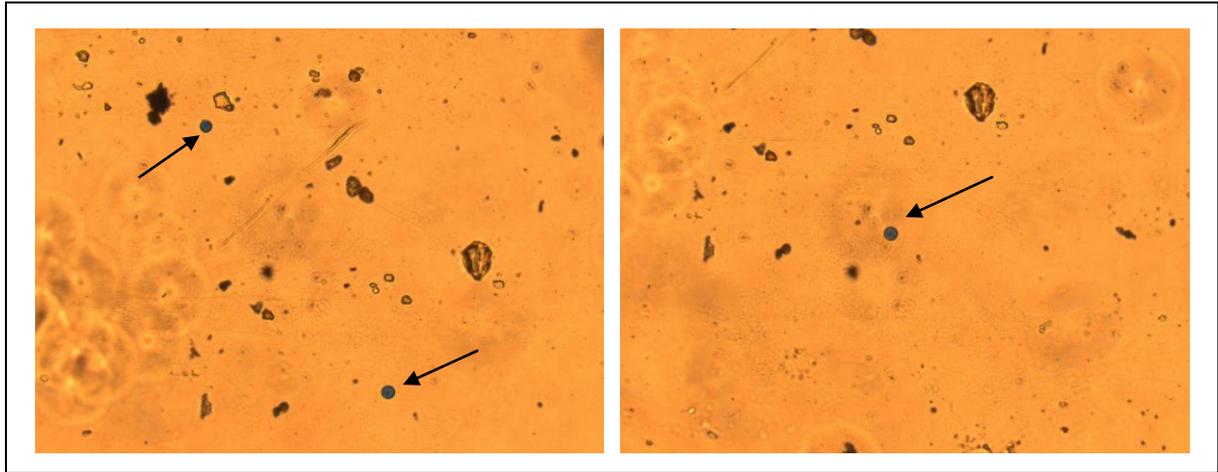
- une modalité 'Témoin' : aucun traitement contre le mildiou n'a été effectué
- une modalité 'Modèle' : les traitements ont été réalisés en se basant sur les alertes émises par MILART.
- une modalité 'Conventionnel' : les traitements ont été effectués de manière systématique dès l'apparition de symptômes de mildiou.

Les traitements ont été effectués avec un phosphite homologué, l'ETONAN, et un engrais foliaire efficace contre *B.lactucae*, le TERFIK, pour se rapprocher au plus près de la réalité des producteurs.

Le dispositif est en bloc (cf. **Figure 10**). Les observations ont été réalisées une fois par semaine. Le pourcentage moyen de surface foliaire touchée (SFT) par le mildiou pour une unité expérimentale a été évalué par deux observateurs à chaque fois. Les notations des différentes modalités ont toujours été effectuées en aveugle, c'est-à-dire sans savoir de quelle modalité il s'agissait.



**Figure 10 : Plan d'expérience pour l'essai de conduite avec MILART mis en place au CATE (station expérimentale du Nord Finistère)**



**Figure 11 :Spores de *Bremia lactucae* vues sous microscope ( $\times 100$ ) colorées par 0,2 g/L d'aniline dans de l'acide lactique et du glycérol (3 :1) (Prises à Vegenov le 06/08/12 par Marie Cochenec)**

Avec les résultats disponibles, des analyses statistiques ont été exécutées avec le logiciel R. Les tests calculés sont des tests ANOVA et des comparaisons multiples afin de savoir si les modalités présentent des différences significatives ou non. Aucune hypothèse n'a été émise sur l'efficacité des stratégies testées. Il s'agit donc de comparaisons effectuées *a posteriori*. Le choix a été fait d'utiliser le test de Newman-Keuls pour ces comparaisons multiples. Ce test est plus puissant que le test de Tukey, mais il présente une erreur globale plus importante.

*Remarque :* Au vu des dates de stage, tous les résultats n'étaient pas disponibles au moment où ce rapport a été rédigé. Seules quatre notations de chaque bloc ont été prises en compte, notamment pour les analyses. Seules des tendances ont donc pu être dégagées.

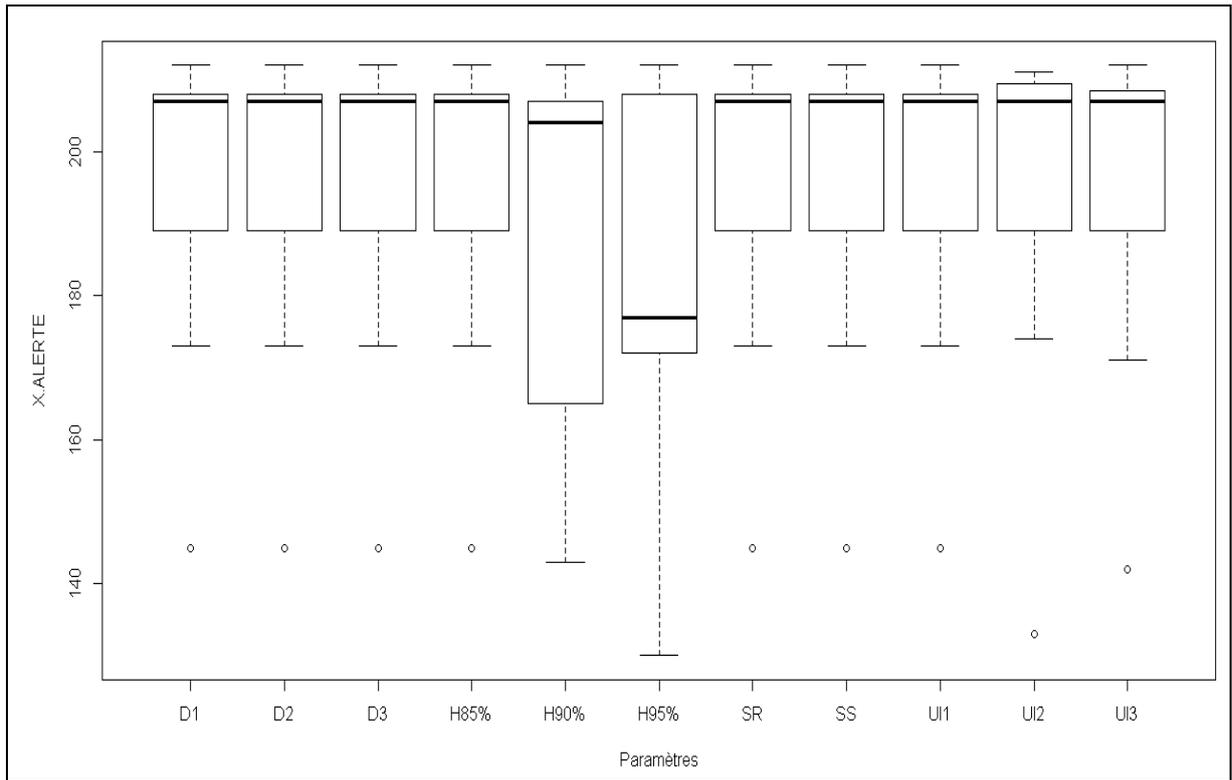
#### □ Suivi de la concentration en spores de l'air par aspiration

Un aspirateur à spore Burkard® a été mis en place dans une culture de drageons d'artichaut du CATE le 21/05/2012 (cf. **Figure 12**). L'objectif est d'arriver à quantifier l'inoculum de départ en suivant la concentration en spores dans l'air.

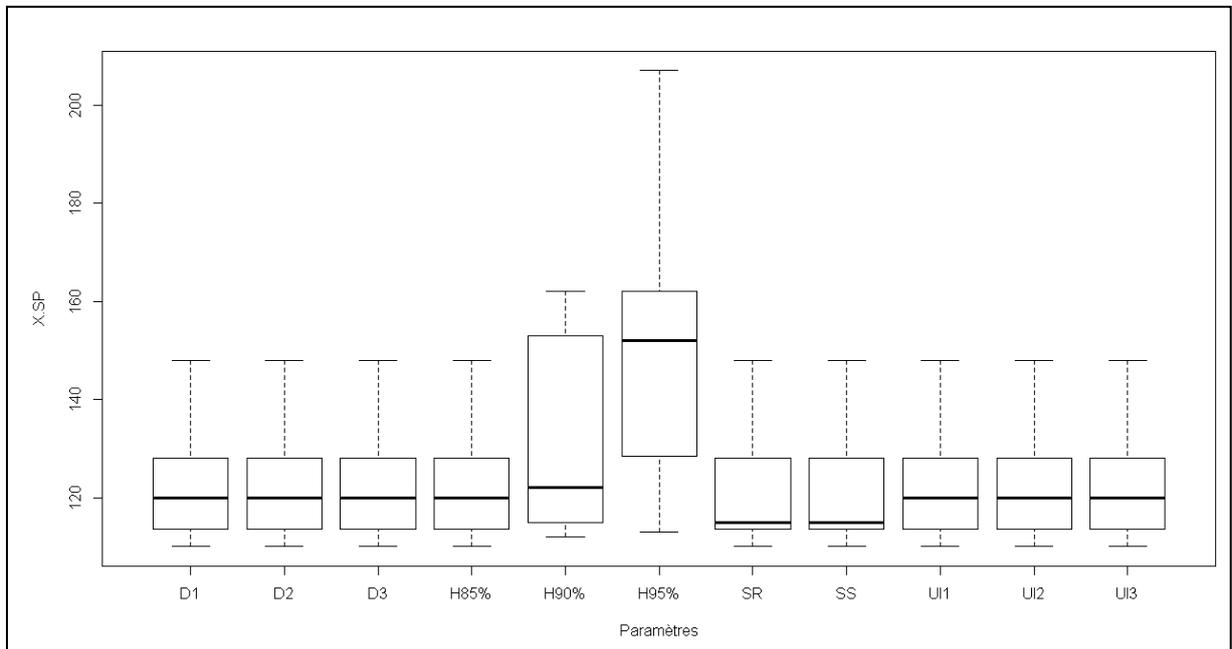


**Figure 12 :** Aspirateur à spore dans une parcelle de drageons d'artichaut au CATE (station expérimentale du Nord Finistère) (Prise à St Pol de Léon le 16/07/12 par Marie Cochenec)

Une bande de 35cm de longueur, enduite de vaseline est placée autour d'un cylindre en rotation (1 tour/semaine) situé au niveau de la fente d'aspiration de l'appareil. L'air extérieur est projeté sur cette bande où toutes les particules, dont les spores de *B.lactucae*, viennent s'y coller. La bande est changée toutes les semaines. Elle est découpée en fragments de 5cm de longueur. Un fragment correspond à une journée. Chacun d'entre-eux est ensuite analysé directement en laboratoire sous microscope avec un colorant composé de 0,2g/L d'aniline dans de l'acide lactique et du glycérol (3 :1) (cf. **Figure 11**). Le nombre de spores est ainsi comptabilisé. Il a ensuite été comparé avec les prévisions de sporulation données par MILART.



**Figure 13 : Boîte de dispersion représentant les données issues de la variable  $\Delta$ ALERTE (nombre de jours avant l'alerte émise par MILART), notée X.ALERTE dans R, en fonction des différents ajustements de paramètres testés lors des simulations MILART**



**Figure 14 : Boîte de dispersion représentant les données issues de la variable  $\Delta$ SP (nombre de jours avant la première sporulation calculée par MILART), notée X.SP dans R, en fonction des différents ajustements de paramètres testés lors des simulations MILART**

#### 4) Résultats et discussions sur l'ajustement et la validation du modèle MILART

##### □ Résultats des régressions linéaires simples effectuées pour l'ajustement des paramètres de MILART

La répartition des dates d'alerte (variable ALERTE) et de première sporulation (variable SP) ne présente pas de différences entre les modalités, sauf en ce qui concerne l'humidité relative choisie comme déclencheur du calcul de la gravité des sporulations.

Les mêmes tendances sont observées pour les données de  $\Delta$ ALERTE, notée X.ALERTE sur le graphique (cf. **Figure 13**), et de  $\Delta$ SP, notée X.SP sur le graphique (cf. **Figure 14**).

La date d'alerte moyenne est souvent émise aux environs du 200<sup>ème</sup> jour de l'année pour une majorité des modalités. En l'absence de traitements phytosanitaires, la date moyenne de première sporulation se situe plutôt au 120<sup>ème</sup> jour de l'année. Seule la modalité H<sub>95%</sub> semble se démarquer avec une date moyenne d'alerte autour du 180<sup>ème</sup> jour et une date moyenne de première sporulation au environ du 150<sup>ème</sup> jour de l'année. Toutes ces dates moyennes sont à relativiser au vu de l'écart-type qui reste assez important pour l'ensemble des modalités.

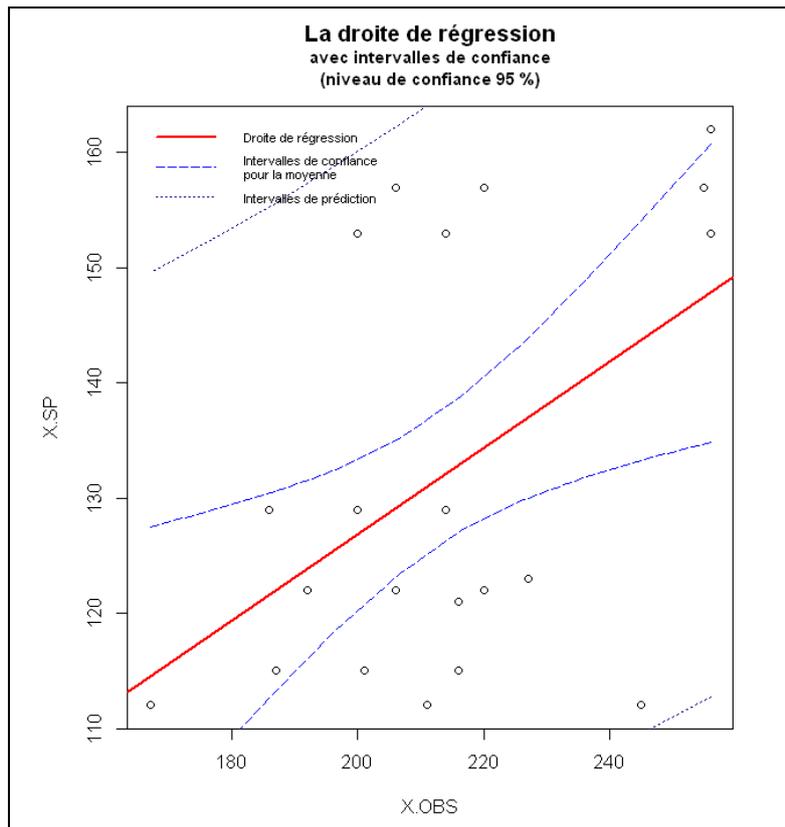
**Tableau 1 : Récapitulatif de l'ensemble des résultats des régressions linéaires exécutées pour comparer les variables ALERTE (date d'alerte émise par MILART) et SP (date de première sporulation calculée par MILART) avec la variable OBS (date de première observation des symptômes de mildiou sur le terrain)**

Modalités	Taille échantillon	R <sup>2</sup>		r		P-valeur ANOVA	
		ALERTE	SP	ALERTE	SP	ALERTE	SP
UI1	36	99,27	99,67	<b>0,9963</b>	<b>0,9983</b>	<b>6,66e-38</b>	<b>1,01e-43</b>
UI2	36	99,24	99,67	<b>0,9962</b>	<b>0,9983</b>	<b>1,34e-37</b>	<b>1,09e-43</b>
UI3	36	99,27	99,67	<b>0,9963</b>	<b>0,9983</b>	<b>7,11e-38</b>	<b>1,09e-43</b>
H85	36	99,27	99,67	<b>0,9963</b>	<b>0,9983</b>	<b>6,66e-38</b>	<b>1,01e-43</b>
H90	37	98,87	99,67	<b>0,9943</b>	<b>0,9983</b>	<b>1,16e-35</b>	<b>5,97e-45</b>
H95	34	99,19	99,65	<b>0,9959</b>	<b>0,9982</b>	<b>4,59e-35</b>	<b>7,03e-41</b>
D1	36	99,27	99,67	<b>0,9963</b>	<b>0,9983</b>	<b>6,66e-38</b>	<b>1,01e-43</b>
D2	36	99,27	99,67	<b>0,9963</b>	<b>0,9983</b>	<b>6,94e-38</b>	<b>1,09e-43</b>
D3	36	99,27	99,67	<b>0,9963</b>	<b>0,9983</b>	<b>6,94e-38</b>	<b>1,09e-43</b>
SS	36	99,28	99,66	<b>0,9966</b>	<b>0,9983</b>	<b>5,68e-38</b>	<b>1,85e-43</b>
SR	36	99,28	99,66	<b>0,9966</b>	<b>0,9983</b>	<b>5,68e-38</b>	<b>1,85e-43</b>

*r\** de la table du coefficient de corrélation ( $\alpha = 0,05$  et d.d.l. = 35) = 0,3246  
*r* en gras > *r\** de la table et p-valeurs en gras < 0,05

Rappel de la signification des modalités :

- UI<sub>1</sub>, UI<sub>2</sub> et UI<sub>3</sub> : modalités pour les unités d'incubation.
- H85, H90 et H95 : modalités pour les hygrométries seuils de sporulation
- D1, D2 et D3 : modalités pour la durée de survie des spores
- SS et SR : modalités pour la sensibilité variétale et phénologique



**Figure 15 : Régression linéaire simple entre  $\Delta SP$  (nombre de jours avant la première sporulation calculée par MILART), notée X.SP dans R, et  $\Delta OBS$  (nombre de jours avant la première apparition des symptômes de mildiou), notée X.OBS dans R, réalisée pour la modalité H<sub>90%</sub>.**

**Tableau 2 : Récapitulatif de l'ensemble des résultats des régressions linéaires exécutées pour comparer les variables  $\Delta ALERTE$  (nombre de jours avant l'alerte émise par MILART) et  $\Delta SP$  (nombre de jours avant la première sporulation calculée par MILART) avec la variable  $\Delta OBS$  (nombre de jours avant la première apparition des symptômes de mildiou)**

Modalités	Taille échantillon	R <sup>2</sup>		r		P-valeur ANOVA	
		$\Delta ALERTE$	$\Delta SP$	$\Delta ALERTE$	$\Delta SP$	$\Delta ALERTE$	$\Delta SP$
UI1	30	10,67	1,60	0,3266	0,1265	0,0781	0,505
UI2	28	36,03	25,79	<b>0,6002</b>	<b>0,5078</b>	<b>0,000734</b>	<b>0,0058</b>
UI3	29	37,08	22,34	<b>0,6089</b>	<b>0,4727</b>	<b>0,000456</b>	<b>0,00962</b>
H85	30	10,67	1,60	0,3266	0,1265	0,0781	0,505
H90	33	22,53	21,42	<b>0,4747</b>	<b>0,4628</b>	<b>0,00526</b>	<b>0,00668</b>
H95	33	17,14	6,42	<b>0,4140</b>	0,2534	<b>0,0166</b>	0,155
D1	28	25,45	7,62	<b>0,5045</b>	0,2760	<b>0,00619</b>	0,155
D2	28	25,85	7,21	<b>0,5084</b>	0,2685	<b>0,00573</b>	0,167
D3	28	25,85	7,21	<b>0,5084</b>	0,2685	<b>0,00573</b>	0,167
SS	30	6,74	0,08	0,2596	0,0283	0,166	0,882
SR	30	6,74	0,08	0,2596	0,0283	0,166	0,882

*r*\* de la table du coefficient de corrélation ( $\alpha = 0,05$  et d.d.l. = 30) = 0,3494  
*r* en gras > *r*\* de la table et p-valeurs en gras < 0,05

Les régressions linéaires réalisées avec les variables ALERTE, SP et OBS montrent que pour l'ensemble des modalités, le coefficient de corrélation  $r$  est supérieur à  $r^* = 0,3246$  issu de la table pour une probabilité de  $\alpha = 0,05$  avec un nombre de degré de liberté (d.d.l.) de 35 (cf. **Annexe V**). Ceci signifie qu'en globalité, le modèle est pertinent pour toutes les modalités. De même, la p-valeur de l'ANOVA est toujours inférieure à 0,05 quelle que soit la modalité. Les liaisons entre la variable observée sur le terrain et les variables estimées sont donc toutes significatives (cf. **Tableau 1**).

Ces résultats manquent de précisions. Ils ne permettent pas de distinguer les modalités entre-elles. C'est pourquoi une analyse statistique plus fine a été réalisée avec les variables modifiées  $\Delta$ OBS,  $\Delta$ ALERTE et  $\Delta$ SP. Ces dernières ne tiennent pas compte des années, mais seulement des jours et des mois ce qui permet de s'affranchir de l'effet annuel.

Les régressions linéaires effectuées entre les variables  $\Delta$ ALERTE et  $\Delta$ OBS, et entre  $\Delta$ SP et  $\Delta$ OBS ont permis de mettre en évidence des différences entre les modalités testées (cf. **Figure 15 et Tableau 2**). Ces résultats ont donné la possibilité d'ajuster le modèle afin que celui-ci soit au plus proche de la réalité du terrain.

Pour les deux modalités  $UI_2$  et  $UI_3$ , les p-valeurs des tables de variance pour les variables  $\Delta$ ALERTE et  $\Delta$ SP, sont inférieures à 0,05. Les dates estimées par MILART et les dates observées sur le terrain sont donc dépendantes entre-elles de façon significative, ce qui n'est pas le cas pour  $UI_1$ . Par ailleurs,  $UI_2$  présente un coefficient de corrélation  $r$  plus élevé pour la variable  $\Delta$ SP (0,5078) alors que  $UI_3$  a un  $r$  plus important pour  $\Delta$ ALERTE (0,6089).

Pour le paramètre d'humidité  $H$  déclenchant le calcul de sporulation, les modalités  $H_{90\%}$  et  $H_{95\%}$  se démarquent au niveau de la variable  $\Delta$ ALERTE. Leurs p-valeurs de l'ANOVA sont respectivement de 0,0526 et de 0,0166 ce qui est inférieur à 0,05. Les coefficients de corrélation  $r$  pour ces deux modalités sont supérieurs au  $r^* = 0,3494$  issu de la table. Ceci montre que le modèle est corrélé avec ce qui est observé sur le terrain. De plus, la modalité  $H_{90\%}$  obtient également une liaison significative entre les dates de la variable  $\Delta$ SP et les dates observées ( $r = 0,4628 > r^* = 0,3494$ ).

Les modalités de la durée de survie des spores  $D$  ne se différencient pas entre-elles. Les trois modalités présentent une bonne correspondance entre les dates estimées de  $\Delta$ ALERTE et les dates observées. Les coefficients de corrélation  $r$  sont supérieurs au  $r^*$  issu de la table. De même, les p-valeurs de la table de variance sont inférieures à 0,05 dans les trois cas.

En ce qui concerne les deux modalités pour la sensibilité variétale et phénologique, les liaisons ne sont pas significatives.

#### □ Discussion sur cet ajustement

Les régressions linéaires réalisées en tenant compte des années (variables ALERTE, SP et OBS) montrent que le **modèle MILART a une bonne estimation de la réalité du terrain** ( $R^2 > r = 0,3246$  pour une probabilité de  $\alpha = 0,05$  et avec un d.d.l. de 35). Mais cette approche est trop globale pour pouvoir distinguer les modalités entre-elles.

Les coefficients de corrélation calculés sans tenir compte des années (variables  $\Delta$ ALERTE,  $\Delta$ SP et  $\Delta$ OBS) ont permis de mieux démarquer les modalités entre-elles.

La **marge d'erreur** constatée entre les dates estimées et les dates observées est essentiellement due au manque d'informations concernant les traitements phytosanitaires qui ont été réellement effectués chez les producteurs. Les simulations ont toutes été effectuées avec l'hypothèse qu'aucun traitement n'avait été réalisé. Or les producteurs ont forcément traité leur parcelle de drageons à un moment, et les **plannings de traitements n'ont pas toujours été bien communiqués** selon les années.

Une autre source d'erreur est possible. **Des variations peuvent exister entre ce que la station météorologique mesure et le climat réel à l'échelle de la parcelle.** Certains modèles vont jusqu'à prendre en compte le microclimat autour de la feuille. Par exemple, le modèle DOWNCAST pour la prédiction des risques de mildiou sur oignon utilise des mesures de l'humidité des feuilles. Ainsi, ce modèle peut déterminer si le microclimat dans une parcelle est favorable ou non à la sporulation du champignon. (De Visser, 1998).

De même, le modèle ZWIPERO prévoit les risques de sporulation et d'infection par *Peronospora destructor* en utilisant une estimation de l'humidité des feuilles. Cependant, il est extrêmement difficile de prévoir correctement le taux de dépôt de rosée et sa quantité au niveau des feuilles (Friedrich, 2003).

Finalement, il faut faire un compromis, et choisir à quelle échelle il faut se placer pour le recueil des données météorologiques. Le modèle MILONI de prévisions des risques de mildiou sur oignon fonctionne sur le même principe que MILART. Il utilise aussi un réseau de stations météorologiques et émet ses prévisions à l'échelle de la parcelle. Il a été montré que MILONI permettait quand même une meilleure gestion de cette maladie en diminuant le nombre de traitements pour une efficacité équivalente par rapport à une stratégie de traitements systématiques (Monnet, 2002).

Les données météorologiques plus globales sont plus pratiques d'utilisation pour les modèles. Elles ne nécessitent pas d'appareils spécifiques de haute précision, et peuvent être recueillies via un réseau de stations météorologiques. Actuellement, en Bretagne, un tel réseau est en train d'être mis en place dans l'objectif d'une utilisation en agriculture. Par exemple, les données météorologiques disponibles seront utilisées pour la gestion des cultures par les producteurs ou pour les calculs de modèle épidémiologique (Mezencev, 2012).

De plus, ce type de données donne la possibilité d'étendre plus facilement la zone d'application des modèles. Il suffit simplement de relier une station météorologique au réseau de stations consultées par le modèle, et de vérifier la concordance entre les simulations et les observations de terrain.

Dans notre étude, les simulations de MILART sont de bonne qualité au vu des résultats de  $R^2$ . Il est probable que l'état de la parcelle, son enherbement, voire l'état physiologique des plantes aient une influence plus importante que la localisation géographique par rapport à la station météorologique sur les prévisions. Mais cette hypothèse pourrait être vérifiée. Il serait donc judicieux **d'étudier l'effet de l'éloignement des parcelles de la station météorologique sur les prévisions du modèle MILART.**

En ce qui concerne l'ajustement du modèle MILART, les régressions linéaires effectuées avec les variables  $\Delta OBS$ ,  $\Delta ALERTE$  et  $\Delta SP$  ont permis de mettre en évidence les modalités les plus adaptées à la réalité du terrain.

Ainsi, pour le paramètre d'unité d'incubation UI, la modalité UI<sub>2</sub> est la plus satisfaisante, notamment parce qu'elle représente le meilleur compromis au niveau des corrélations entre les dates d'alerte et de première sporulation estimées par MILART, et la date d'observation des symptômes de mildiou sur le terrain. Cette modalité a donc été choisie pour le calcul des unités d'incubation dans le modèle.

Pour l'humidité seuil déclenchant le calcul de la sporulation, les modalités H<sub>85%</sub>, H<sub>90%</sub> et H<sub>95%</sub> se distinguent lorsqu'elles sont comparées sur le plan de la date d'alerte émise par MILART. H<sub>90%</sub> est mieux corrélée avec cette dernière que H<sub>85%</sub> et surtout H<sub>95%</sub>. Dans la suite de ce travail, c'est donc H<sub>90%</sub> qui a été retenu comme paramètre d'humidité seuil pour la sporulation.

Au niveau de la durée de survie des spores, aucune différence n'a été constatée entre les trois modalités. La variation entre elles au niveau du paramétrage n'était sans doute pas assez importante pour noter une différence entre les coefficients de corrélation et les p-valeurs des tables de variance. Les valeurs de paramétrage étant issues de la bibliographie, il aurait peut-être été intéressant de tester des valeurs purement théoriques afin d'être sûr de la validité de D1.

Il faut tout de même noter que pour les trois modalités, les liaisons entre les dates estimées et les dates observées sur le terrain sont significatives. Ces résultats signifient que le paramètre de durée de survie des spores est important dans le fonctionnement de MILART. En effet, le modèle utilise la durée de survie des spores dans un air sec pour valider ou non la continuité de 2 cycles d'incubation successifs (Monot *et al.*, 2011). Dans un épisode climatique pluvieux, l'épidémie ne s'arrêtera pas sur ce critère de survie des spores, et inversement, si le temps est sec, tout s'arrêtera (Mezencev, 2012).

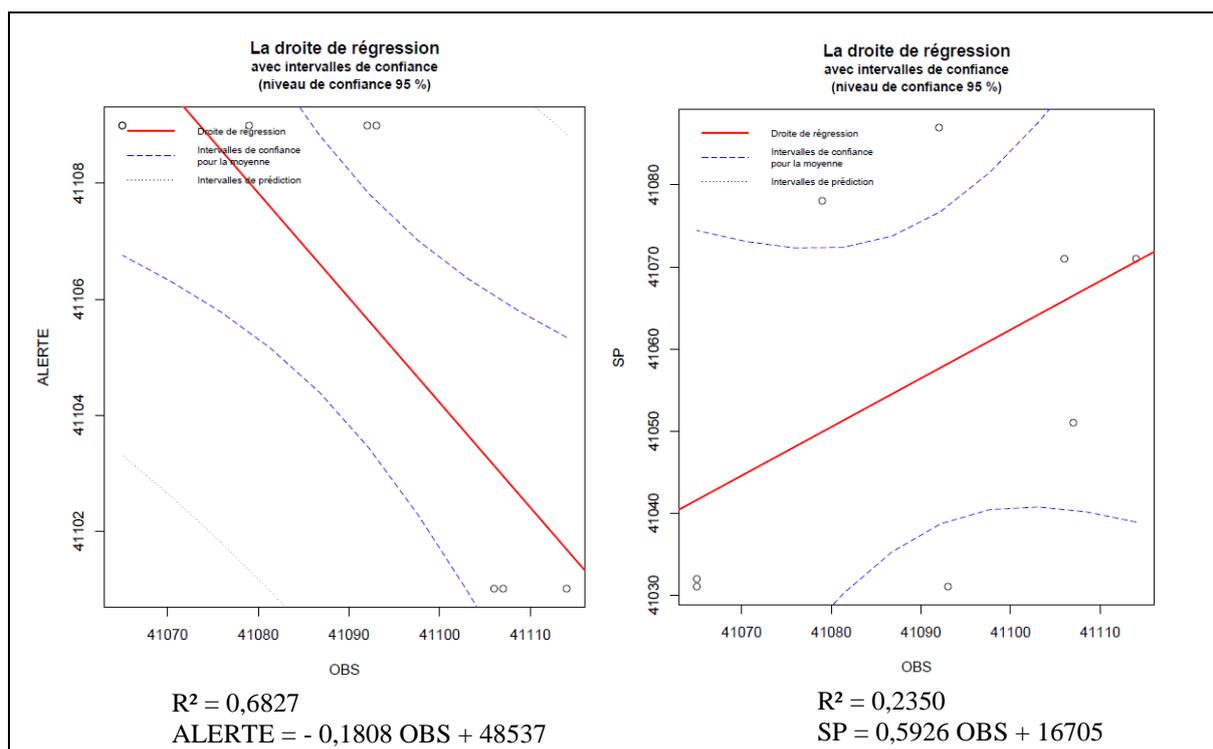
Les régressions linéaires effectuées pour les modalités de la sensibilité variétale et phénologique n'ont pas donné de résultats probants. Les variables  $\Delta$ ALERTE et  $\Delta$ SP ne sont pas liées significativement à la variable  $\Delta$ OBS. Les variétés n'ont sans doute pas une grande influence sur le développement du mildiou, contrairement à ce qui était supposé. Il a toujours été admis que la variété 'Camus' était plus tolérante au *B.lactucae* que la variété 'Castel'. En effet, la maladie semble se développer plus rapidement sur la variété 'Castel'.

Cependant, les tests au laboratoire ne sont pas aussi concluants. Ils ont montré qu'il n'y avait pas de différences significatives entre ces deux variétés (Monot, 2012). Du point de vue des « primo-infections », le modèle MILART ne quantifiant pas la gravité du mildiou, il est vraisemblable que les comportements des variétés sensibles ou peu sensibles soient les mêmes (Mezencev, 2012).

Dans la réalité du plein champ, l'hypothèse que le port de la plante aurait un rôle sur la sensibilité variétale pourrait donner une explication. Actuellement, il existe peu de modèles intégrant l'architecture des plantes qui reste très complexe à modéliser (Casadebaig, 2009), de même qu'il y a très peu de modèles quantitatifs (Mezencev, 2012). Il serait tout de même intéressant d'étudier plus en détails l'interaction entre l'architecture de l'artichaut et *B.lactucae*.

Au vu de l'ensemble de ces résultats, le modèle MILART a pu être ajusté au niveau de ces paramètres. **Les modifications pour la validation ont été les suivantes :**

- UI<sub>1</sub> a été remplacée par UI<sub>2</sub>
- H<sub>85%</sub> a été remplacé par H<sub>90%</sub>
- D1 n'a pas été modifiée
- Le coefficient 4 de résistance variétale et phénologique a été remplacé par 3 pour les variétés peu sensibles



**Figure 16 : Régressions linéaires simples entre la variable ALERTE (date d'alerte émise par MILART) et OBS (date de premières observations de symptômes sur les parcelles du réseau 2012), et entre SP (date de première sporulation calculée par MILART) et OBS**



**Figure 17 : Boîtes de dispersion représentant le pourcentage de surface foliaire touchée (SFT) pour les trois modalités (Témoin, Modèle, Conventionnel) de l'essai de comparaison entre la stratégie conventionnelle de protection contre le mildiou et celle issue de MILART mis en place au CATE (station expérimentale du Nord Finistère)**

□ **Validation du modèle MILART avec les données de l'année 2012**

Les résultats de la régression linéaire (cf. **Tableau 3 et Figure 16**) entre la variable ALERTE et OBS montrent qu'il existe une corrélation hautement significative entre la date d'alerte émise par MILART et les observations de l'évolution du mildiou dans les parcelles du réseau 2012.

**Tableau 3 : Résultats des régressions linéaires simples entre la variable ALERTE (date d'alerte émise par MILART) et OBS (date de premières observations de symptômes sur les parcelles du réseau 2012), et entre SP (date de première sporulation calculée par MILART) et OBS**

	Taille échantillon	R <sup>2</sup>	<i>r</i>	P-valeur ANOVA
ALERTE	8	68,27	<b>0,8263</b>	<b>0,0115</b>
SP	8	23,50	0,4848	0,223

*r*\* de la table du coefficient de corrélation ( $\alpha = 0,05$  et d.d.l. = 8) = 0,6319  
*r* en gras > *r*\* de la table et p-valeurs en gras < 0,05

Le coefficient de corrélation *r* est de 0,8263 ce qui est supérieur au *r*\* de la table (cf. **Annexe V**), même pour une probabilité de  $\alpha = 0,01$  avec un d.d.l. de 8 (*r*\* = 0,7646). La probabilité critique de la table de variance indique également que la date d'alerte émise par le modèle est corrélée aux observations de terrain ( $0,0115 < \alpha = 0,05$ ).

En revanche, pour la variable SP (date de première sporulation calculée par MILART), le coefficient de corrélation *r* (0,4848) est inférieur à celui de la table pour une probabilité de  $\alpha = 0,05$  avec un d.d.l. de 8 (*r*\* = 0,6319). La p-valeur de l'ANOVA montre également que la date de première sporulation calculée par le modèle est peu corrélée aux dates de premières apparitions des symptômes de mildiou sur artichaut ( $0,223 > \alpha = 0,05$ ).

En ce qui concerne l'essai de comparaison entre les stratégies de protection contre le mildiou, le modèle MILART a suggéré un traitement contre le mildiou en donnant une alerte le 20/06/2012. Il a été effectué avec de l'ETONAN le 20/06/2012. Pour la stratégie 'Conventionnel', deux traitements ont été réalisés :

- L'un avec du TERFIK (phosphite de potassium) à 2,5 L/ha le 19/06/2012
- L'autre avec de l'ETONAN (phosphite de potassium) à 1,5 L/ha le 20/07/2012.

La table de la variance montre qu'il n'y a pas de différences significatives entre les modalités (cf. **Figures 17 et 18**). La probabilité critique de l'ANOVA (0,239) est supérieure à  $\alpha = 0,05$  ce qui signifie que le facteur testé (ici, la stratégie de protection contre le mildiou) n'a pas d'effet significatif sur le pourcentage de surface foliaire touchée par *B.lactucae*. Le test de Newman-Keuls montre en effet, que les trois modalités ne peuvent pas être distinguées de façon significative avec les résultats actuels.

TABLE D'ANALYSE DE LA VARIANCE					
	Somme des carrés	Degré de liberté	Moyenne des carrés	Statistique F	p-valeur
Modalites	1097.347	2	548.674	1.494	0.239
Résidus	12117.042	33	367.183		

Neuman-Keuls			
Modalites	Nombre d'observations	Moyenne	Groupe
Temoin	12	35.458	a
Modele	12	30.75	a
Conventionnel	12	22.125	a

**Figure 18 : Résultats de l'ANOVA et du test de Newman-Keuls (logiciel R) pour l'essai de comparaison entre la stratégie conventionnelle de protection contre le mildiou et celle issue de MILART**

## □ Discussion autour de la validation

**Le réseau de parcelles suivies a permis de valider le paramétrage ajusté du modèle MILART pour la date d'alerte émise.** Ce réseau était constitué au départ de 12 parcelles, mais au final, les régressions linéaires n'ont pu tenir compte que de 8 parcelles. En effet, sur deux parcelles, aucun symptôme de mildiou n'a été détecté, notamment parce qu'elles ont été traitées au bon moment. En conséquence, aucune date de premières apparitions de symptômes au champ n'a pu être relevée. Sans données, il n'a pas été possible de faire d'analyses statistiques. Pour ces deux parcelles, le modèle MILART n'a d'ailleurs prédit aucune apparition de mildiou. Ceci conforte le fait que le modèle estime bien la réalité.

En revanche, pour deux autres parcelles, le modèle MILART n'a pas donné d'alerte alors que des symptômes de mildiou sont apparus. Ceci illustre le fait qu'un modèle reste une approximation de la réalité. Les modèles ont donc besoins d'être validés de façon continue pour limiter la marge d'erreur possible (Rouzet, Pueyo, 2006).

Cette année, lors du suivi du réseau de parcelles, les plannings de traitement ont été mieux pris en compte afin d'éliminer le biais pouvant provenir des dates de traitement.

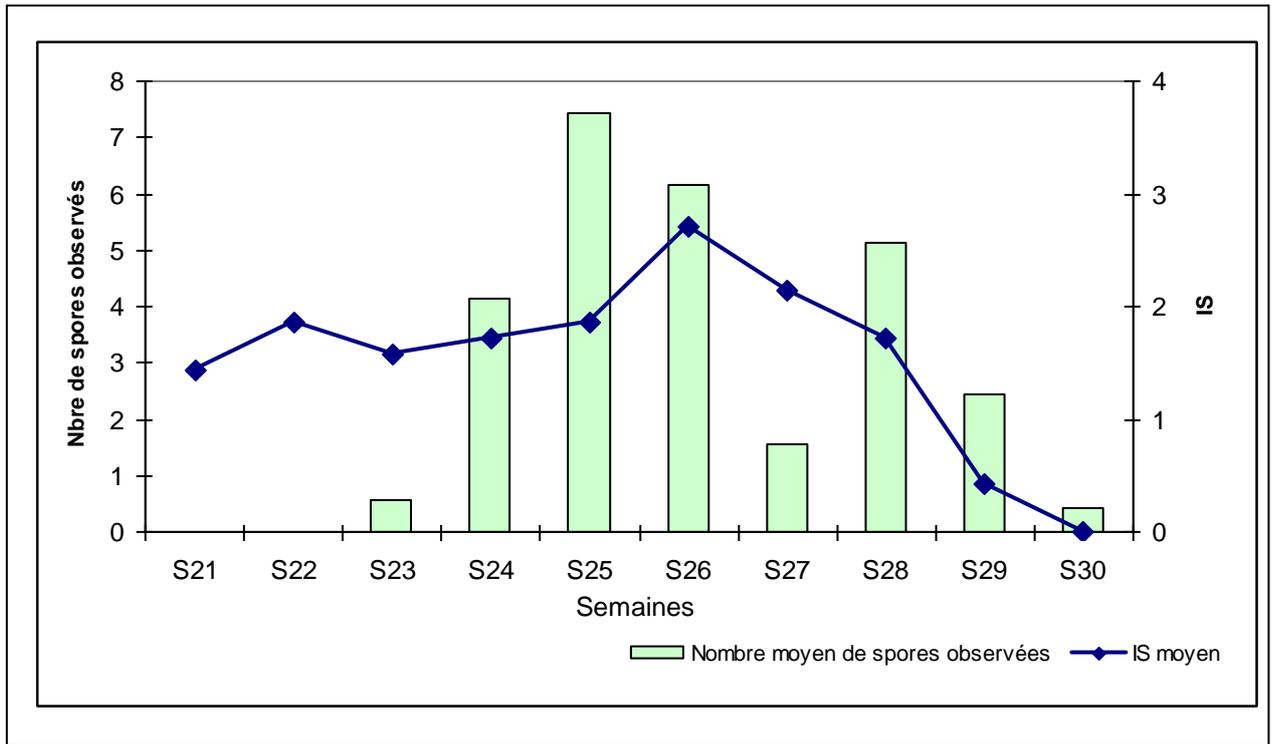
**En ce qui concerne la date de première sporulation calculée par MILART, le modèle ne peut pas être validé.** La marge d'erreur pour cette variable est issue du fait que la quantification de l'inoculum primaire est difficile. Actuellement, la conservation de *B.lactucae* dans les cultures d'artichaut durant la période hivernale n'est pas connue. Ceci complique l'ajustement du modèle pour le calcul de première sporulation, car si la quantité d'inoculum présent au départ était connue, il serait plus facile d'appréhender le début des cycles d'incubation, et donc des premières sporulations. Cet aspect a été étudié par le mildiou de la laitue, mais pas pour celui de l'artichaut.

Etant donné que les cycles culturaux de ces deux productions sont très différents, les cycles de développement des deux maladies sont sans doute différents (Janvier *et al.*, 2008), surtout pour la conservation en période hivernale.

**Au niveau de l'essai mis en place au CATE, les résultats ne permettent pas d'émettre une conclusion tranchée.** Tous les résultats n'étant pas encore disponibles, il est difficile d'émettre un avis. La modalité conduite par le modèle MILART n'a nécessité qu'un seul traitement, alors que la modalité en conventionnel en a reçu deux. Les tendances observées montrent quand même que **la modalité 'Modèle' permet de réduire la progression du mildiou**, mais elle n'atteint pas le niveau de la modalité 'Conventionnel'.

Par ailleurs, aucune différence significative entre la modalité 'Conventionnel' et les autres modalités n'a été démontré alors qu'un traitement phytosanitaire en plus a été effectué. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'un des deux traitements réalisés a été mal positionné. Il n'a donc pas eu l'efficacité espérée sur le mildiou. Le modèle peut au moins permettre d'éviter ce genre de positionnements.

Vers la fin du mois d'Août, le modèle MILART a émis une nouvelle alerte au mildiou le 25/07/2012. Aucun traitement n'a pu être effectué sur cette période. En conséquence, quinze jours après cette alerte, des symptômes de mildiou sont apparus au niveau des capitules d'artichaut. Le modèle prédit donc correctement les risques de mildiou. Comme la modalité 'Modèle' a subi moins de traitement, elle a été plus touchée par le mildiou au niveau des capitules. Si le traitement avait pu être exécuté au moment de l'alerte, il aurait sans doute suffi pour ne pas avoir de symptômes de mildiou sur les capitules.



**Figure 19 : Résultats du comptage de spores collectées par l'aspirateur mis en parallèle des estimations des indices de sporulation (IS) calculés par le modèle MILART en fonction des semaines (S)**

Par ailleurs, il faut aussi ajouter qu'**aucune étude n'a été réellement réalisée sur le seuil de tolérance au mildiou pour l'artichaut** (Pérennec, 2012). Il s'agirait de connaître le pourcentage de symptômes qu'il est possible de tolérer dans une parcelle sans avoir de conséquences sur le rendement commercialisable. Ce seuil doit aussi prendre en compte le fait qu'actuellement, aucune solution curative n'existe contre le mildiou. Il faut trouver un équilibre qui permettrait de diminuer les traitements contre le mildiou sans perdre la rentabilité économique de la production.

## 5) Résultats et discussion par rapport à l'inoculum primaire

### □ **Résultats de la comparaison entre l'aspirateur à spore et les prévisions de sporulation de MILART**

Le graphique (cf. **Figure 19**) montre que le pic de spores présentes dans l'air arrive en semaine 25 (mi-juin). Le modèle MILART prédit un pic de sporulation plutôt en semaine 26 (fin juin). Le décalage entre les observations et les estimations du modèle est donc d'une semaine. De plus, le modèle surestime largement le nombre de spores dans les premières semaines par rapport à ceux qui a été compté réellement.

*Remarque :* Le comptage de spores collectées par l'aspirateur a été représenté sur le même graphique que les indices de sporulation calculés par le modèle MILART. Il faut faire attention à l'interprétation de ce graphique car les échelles ne sont pas les mêmes. L'indice de sporulation ne varie que de 0 à 4, alors que le comptage de spores n'a pas de maximum.

### □ **Discussion au sujet de l'inoculum primaire**

Tout d'abord, **le modèle MILART n'est pas quantitatif**. Il ne renseigne pas sur la sévérité du mildiou dans la culture. Il indique seulement la présence d'un risque d'apparitions du mildiou. Les résultats ne peuvent donc pas nous renseigner sur la justesse de la prédiction au niveau de l'intensité de sporulation. Ici, il s'agit surtout de savoir si MILART prédit correctement l'arrivée des premières sporulations en termes de dates.

Dans les premières semaines, le modèle prévoit la présence de spores alors qu'en fait il n'y en a que très peu. Il n'est pas possible de calculer exactement cette différence puisque le modèle est qualitatif. Il aurait été intéressant de pouvoir transformer le nombre de spores comptées dans l'air en indice de sporulation. Ainsi, l'interprétation aurait été plus facile, et l'appréhension de la prédiction de MILART plus juste.

**Le modèle a également montré qu'il avait cette année (2012) une semaine de retard par rapport à ce qui a été observée dans la parcelle.** Il faudrait comparer avec une autre année pour savoir si ce décalage est récurrent, ou s'il est lié à l'année en particulier. Ceci permettrait notamment d'ajuster les paramètres entrant dans le calcul des indices de sporulation afin de l'affiner.

Comme déjà cité auparavant, ce suivi de spores dans l'air expose la **difficulté de quantifier précisément l'inoculum primaire** et de savoir quand il est susceptible d'apparaître. Pour le mildiou de la laitue, cet inoculum peut provenir des plantes avoisinantes ou des débris de la culture précédente (Blancard *et al.*, 2003).

Il a été montré que *B.lactucae* parasite surtout deux tribus d'Astéracées : *Lactuceae* et *Cardueae* qui regroupe les cardons et les artichauts (Voglmayr *et al.*, 2004). Or en Bretagne, le cardon n'est pas présent naturellement, donc l'inoculum primaire peut difficilement venir de plantes sauvages. De plus, comme la culture d'artichaut dure 2 à 3 ans (Pérennec, 2011), les débris de culture ont peu d'impact. Cependant, d'autres espèces de la famille des Astéracées pourraient être des vecteurs du mildiou. Cette hypothèse devrait être vérifiée par le biais d'une étude approfondie sur la souche de *B.lactucae* infectant les artichauts. Peut-être que cette souche peut infecter d'autres Astéracées, dont des plantes sauvages situées en bordure de parcelles.

Une autre hypothèse peut être émise. **Comme les plants d'artichaut sont conservés d'une année sur l'autre, le mildiou se conserve peut-être directement dans le plant.** Pour étudier cette piste, il serait intéressant d'effectuer des tests de biologie moléculaire afin de détecter la présence ou non de *B.lactucae* dans des plants qui peuvent paraître sains. Ceci pourrait expliquer l'importance ou non de l'inoculum primaire d'une année sur l'autre.

De plus, comme il s'agit d'une région légumière, les parcelles de drageons sont souvent à proximité de parcelles de retours plus précoces. Il est fortement possible que **les drageons soient contaminés par ces parcelles d'artichaut de 2 ans** où les sporulations de mildiou apparaissent plus rapidement.

Aujourd'hui, il est nécessaire de **comprendre comment *B.lactucae* se conserve sur l'artichaut** pour pouvoir relier cet aspect à la gravité de la maladie l'année suivante. En pomme de terre, le même problème a été évoqué sur la nécessité d'étudier la relation entre la sévérité du mildiou d'une année et la quantité d'inoculum primaire l'année suivante (Rakotonindrina, 2008).

D'autres méthodes de suivis de l'évolution du nombre de spores dans l'air sont à l'étude. La technique actuelle utilisant l'aspirateur à spore ne permet pas une quantification assez rapide. Les résultats pour une semaine N ne sont connus que la semaine suivante N + 1. Il faut un véritable travail de fond sur la connaissance du cycle de développement de *Bremia lactucae* pour véritablement pouvoir affiner le modèle MILART, notamment sur les aspects de conservation du champignon durant l'hiver.

# Prospection de nouveaux moyens de lutte contre le mildiou de l'artichaut pour la Bretagne Nord

---

## 1) Les stimulateurs de défense des plantes (SDP)

### □ Définition et fonctionnement

Un stimulateur de défense est une substance qui provoque chez certaines plantes l'activation de certains mécanismes de défense contre des stress biotiques ou abiotiques. Cet état de résistance permet à la plante, normalement sensible, de se protéger face à ce stress (Pajot, 2010).

Lorsqu'un pathogène vient infecter une plante, une résistance locale est induite. Elle est rapide et de forte intensité ce qui permet de confiner le pathogène. Il peut notamment s'agir d'une réaction d'hypersensibilité (mort cellulaire programmée). Cette résistance locale est souvent due à la reconnaissance d'un gène du pathogène. Par la suite, dans les zones non infectées de la plante, des mécanismes de défense sont activés. Ils sont moins intenses et mettent plus de temps à être actifs. Il s'agit de la résistance systémique acquise. Ainsi, si le pathogène cherche à s'étendre, ces zones auront une défense plus efficace (Klarzynski, Fritig, 2001). C'est au niveau de cette résistance qu'agissent les stimulateurs de défense.

*Remarque :* Le terme « stimulateur de défense naturel(le) » porte à confusion, car personne ne sait vraiment s'il s'agit de la défense qui est naturelle, ou du stimulateur qui a un mode d'action qualifié de naturel. Afin d'éviter toute ambiguïté dans ce mémoire, il a été choisi le terme de « stimulateur de défense des plantes » (Monot, 2012).

### □ Intérêts et limites

Dans le contexte réglementaire actuel, les SDP représentent une opportunité, notamment parce qu'ils sont moins toxiques pour l'homme et l'environnement que les produits de traitements chimiques (Pajot, 2010). Les mécanismes par lesquels ils agissent, ne sont pas toujours bien connus. Alors que des essais en laboratoire sont très concluants, les expérimentations en plein champ n'arrivent pas toujours à prouver leur efficacité (Amiriaux, 2010).

De plus, dans la réglementation de mise sur le marché, un flou persiste sur ce type de produits. En effet, beaucoup de produits se disent être des SDP, mais le sont-ils vraiment ? Il est difficile de vérifier puisqu'il n'y a pas de législation par rapport à l'utilisation de ce terme sur les étiquettes (Pajot, 2010). Bien souvent, ce sont des engrais ayant pour effet secondaire une stimulation de la défense chez les plantes. Ils ne sont donc pas homologués en tant que produits de protection des plantes (Amiriaux, 2010).

### □ Les essais déjà menés sur les mildious

Face aux oomycètes, il a été remarqué que la défense majeure de plantes résistantes est la réaction d'hypersensibilité ce qui implique une relation gène-gène. Ces plantes arrivent à reconnaître rapidement un gène du pathogène. Elles déclenchent alors l'activation de la mort cellulaire programmée empêchant ainsi sa propagation. Celle-ci peut se limiter à une ou deux cellules chez certaines plantes (Kamoun *et al.*, 1999).

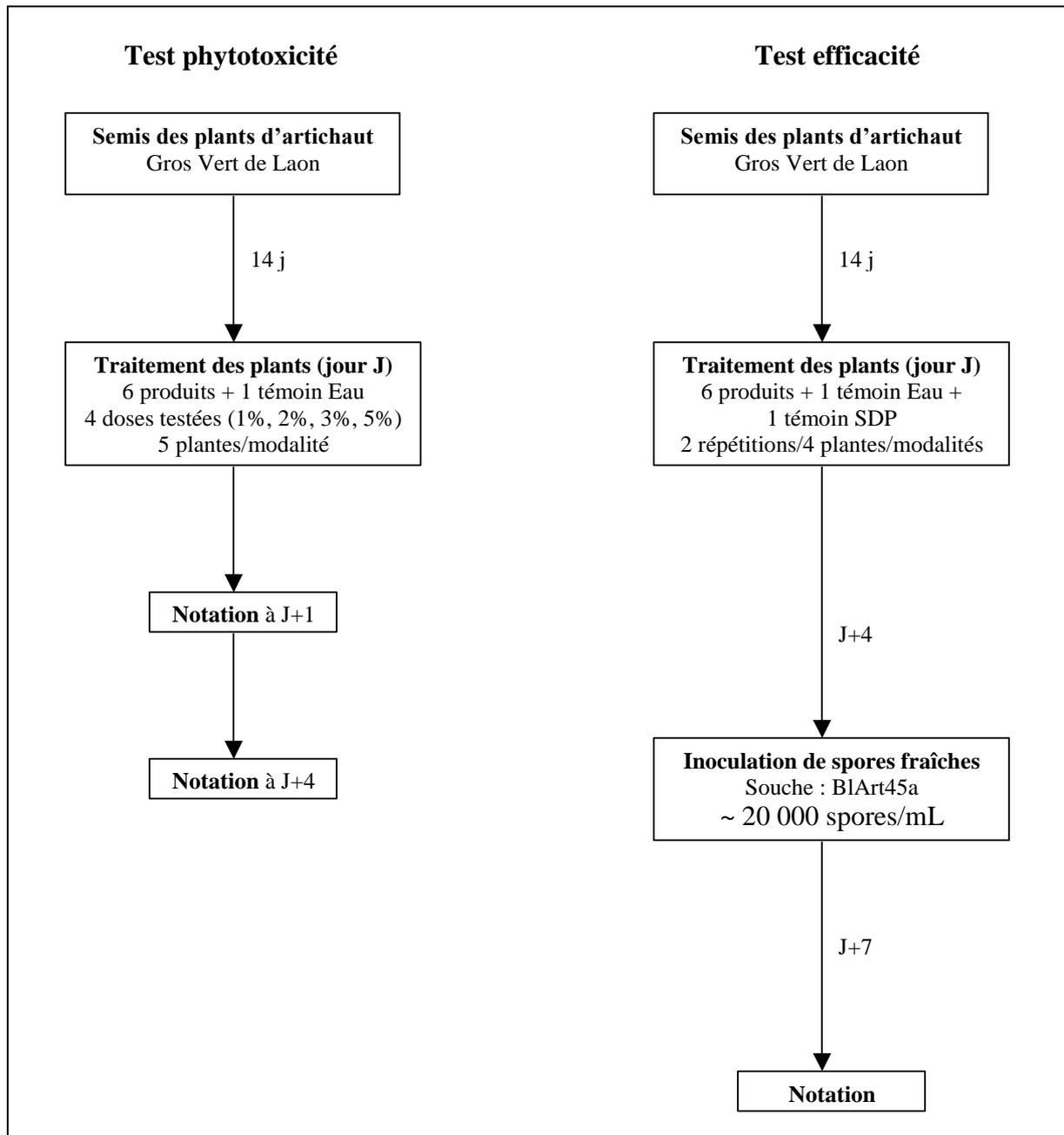


Figure 20 : Déroulement du protocole expérimental pour les tests effectués en laboratoire

Chez *Bremia lactucae*, la relation hôte-pathogène est hautement spécifique au niveau génétique (Lebeda *et al.*, 2001). C'est pourquoi dans le cas de la laitue, des gènes de résistance ont été introduits dans les nouvelles variétés de laitue. Cependant, *Bremia lactucae* arrive rapidement à contourner ces résistances. Ce type de stratégies n'étant pas durable, elle ne présente qu'un faible intérêt dans le cas de l'artichaut d'autant plus que la culture est longue à sélectionner. De plus, le déterminisme génétique de la résistance est probablement de nature quantitative, et les gènes en cause ne sont pas connus (Mezencev, 2012). C'est sans doute la raison pour laquelle il n'existe pas actuellement de variétés d'artichaut résistantes au mildiou (Collet, 2012).

Au niveau des autres mécanismes de défense induits chez la plante, il semblerait qu'à l'endroit de l'infection, des composés phénoliques sont accumulés par la plante. Il a été montré que les phénols et les phytoalexines inhibaient de façon significative *Bremia lactucae* (Lebeda *et al.*, 2001). Constatant ceci, des stimulateurs de défense ont été testés pour lutter contre le mildiou de la laitue. D'autres recherches, plus centrées sur les stimulateurs de défense, ont testées d'autres molécules. Les résultats pour le mildiou de la laitue ont donné une efficacité intéressante de l'acide aminé BABA (acide aminé  $\beta$ -aminobutyrique) (Pajot *et al.*, 2001).

En ce qui concerne le mildiou de l'artichaut, des essais en plein champ ont permis de révéler l'efficacité des phosphites. Ces molécules permettent, en effet, de réduire le mildiou de l'artichaut à un niveau comparable à celui obtenu avec des traitements chimiques (Collet, 2010). Ils ont une influence préventive de 4 à 5 semaines. Une certaine curativité peut être observée dans le cas d'infestations modérées (Mezencev, 2012).

## 2) Essais en laboratoire des stimulateurs de défense des plantes (SDP) contre le mildiou de l'artichaut

### □ Objectifs de l'essai

L'objectif principal de cet essai en laboratoire est de déterminer les produits SDP efficaces contre *B.lactucae* sur artichaut. Plusieurs produits ont été testés en laboratoire afin d'effectuer une pré-sélection. Les produits SDP ainsi choisis ont ensuite été expérimentés en conditions réelles de plein champ.

### □ Protocole expérimental

Le matériel végétal utilisé est issu de semis de graines de la variété Gros Vert de Laon (Voltz) réalisés en serre. Cette variété n'est pas produite en Bretagne, mais elle a été utilisée car elle est particulièrement sensible au *Bremia lactucae* et disponible sous forme de graines. Les semis ont été réalisés 14 jours avant manipulation.

Les produits SDP faisant l'objet d'une démarche d'homologation en tant que stimulateur de défense ont été privilégiés pour les essais en laboratoire. Ainsi, six produits (P11T14, P11T15, P10A04, P10A05, P12JD04 et P12I10) ont été pré-sélectionnés. Par souci de confidentialité, ils ont été codés dans ce mémoire.

Deux tests ont été effectués l'un à la suite de l'autre (**cf. Figure 20**). Le premier est un test de phytotoxicité. Son but est de déterminer la dose optimale à appliquer sans avoir d'effets phytotoxiques pour les plants d'artichaut. Le second est un test d'efficacité permettant de quantifier l'effet du produit sur le mildiou de l'artichaut.

▪ *Le test de phytotoxicité*

Les cinq produits P11T14, P11T15, P10A04, P10A05 et P12JD04 ont été testés pour leur phytotoxicité sur artichaut. Pour le sixième produit (P12I10), la dose optimale (0,50%) a été communiquée directement par l'entreprise le fabriquant.

*Remarque :* Le P11T14 contient des phosphites. Leur mode d'action n'est actuellement pas très clair, et leur rôle dans la plante n'a pas encore connu (Saindrenan *et al.*, 2012). Certains phosphites ont des actions directes sur le développement du mycélium des champignons (Kelderer, Gramm, 2008). D'autres auraient aussi une action de stimulation de la production de phytoalexines chez les plantes (Natali, 2008). Il est donc difficile de savoir si les phosphites sont réellement des stimulateurs de défense des plantes. C'est pourquoi il existe un flou réglementaire au sujet de ces molécules. Des tests en laboratoire ont montré que le P11T14 n'avait pas d'effet direct (anti-germination) sur les spores de *B.lactucae*. Mais cela ne suffit pas pour affirmer s'il s'agit d'un stimulateur de défense des plantes ou non. Les autres produits testés ici, quant à eux, sont considérés comme des stimulateurs de défense des plantes.

Pour chacun des produits, quatre doses ont été testées : 1%, 2%, 3% et 5%. Ces différentes doses ont été pulvérisées sur cinq plantes. Une pulvérisation à l'eau distillée a servi de témoin. Après le traitement, les plants sont stockés dans une mini-serre mise en place en salle de culture avec un éclairage artificiel (**cf. Figure 21**).



**Figure 21 :**Mini-serre dans laquelle sont mis en place les plants d'artichaut (*Prises à St Pol de Léon le 06/07/12 par Marie Cochenec*)

Pour ce test, aucune répétition n'a été effectuée puisqu'il s'agit d'une recherche de dose optimale pour chaque produit. La dose optimale à appliquer doit toujours être inférieure à la dose provoquant des symptômes (type nécrose, déformation des feuilles, etc...), même s'ils sont minimes. Ce choix se fait selon l'appréciation du manipulateur.

Les notations sont effectuées sur les cotylédons des plants d'artichaut. En effet, ils sont plus fragiles que les feuilles, et ils expriment donc mieux les symptômes de phytotoxicité. Deux notations ont été effectuées : un jour après traitements (J+1) et quatre jours (J+4) après traitements. La phytotoxicité a été notée de manière qualitative :

Niveau de phytotoxicité :

- 0 = Aucune phytotoxicité
- 1 = Faible phytotoxicité
- 2 = Moyenne phytotoxicité
- 3 = Forte phytotoxicité

Suite à ce test, la dose maximale pour chaque produit a été déterminée pour la suite des essais.

▪ *Le test d'efficacité*

Les cinq produits (P11T14, P11T15, P10A04, P10A05 et P12JD04) testés ont été utilisés à la dose déterminée par le test de phytotoxicité. Pour P12I10, c'est la dose conseillée par l'entreprise (0,50%) qui a été choisie.

La pulvérisation à l'eau distillée a servi de témoin. Une autre modalité, notée témoin « SDP », a été rajoutée. Cette modalité correspond au traitement à 0,50% par un produit de référence, codé P09PG08, connu pour son effet contre le mildiou de l'artichaut.

Quatre jours après le traitement des plants, une inoculation a été réalisée avec la souche de *B.lactucaea* BlArt45a issue de la collection de Vegenov (laboratoire de biotechnologies végétales). Pour préparer l'inoculum, la souche BlArt45a a été maintenue sur des plantules d'artichaut.

Les cotylédons infectés ont été récoltés et mis dans un tube avec une solution d'eau stérile. Après être passé à l'agitateur, les cotylédons ont été retirés de la solution contenant ainsi les spores de *B.lactucaea*. Le calibrage de la solution à 20 000 spores/mL a été faite avec une cellule de Malassez sous microscope.

Les observations ont été effectuées une semaine après l'inoculation. Les notations ont été faites sur les cotylédons selon l'échelle suivante :

Indice de maladie :

- 0 = Pas de sporulations de mildiou
- 3 = Faibles sporulations très localisées en face inférieure du cotylédon
- 5 = Sporulations localisées en faces inférieure et supérieure du cotylédon
- 7 = Sporulations plus étendues en faces inférieure et supérieure du cotylédon
- 9 = Sporulations recouvrant tout le cotylédon (faces inférieure et supérieure)

Les traitements et l'inoculation ont été réalisés sur deux godets contenant chacun quatre plantes. Le godet étant considéré comme l'unité expérimentale, ceci constitue deux répétitions pour chaque modalité.

De plus, le test efficacité a été reconduit une seconde fois avec la même procédure (même nombre de plants, mêmes traitements, mêmes conditions expérimentales). Le but est de confirmer les résultats obtenus lors du premier essai.

Les résultats bruts ont ensuite été analysés. Les efficacités par rapport à l'eau ont été calculées à partir des indices de maladie (IM) selon la formule suivante :

$$\text{Efficacité} = \frac{(IM_{\text{eau}} - IM_{\text{produit}})}{IM_{\text{eau}}} \times 100$$

Puis des analyses statistiques ont été effectuées pour les indices de maladie moyens et les efficacités calculées avec le logiciel R. Des tests ANOVA ont ensuite été exécutés, avant de réaliser des comparaisons multiples. Il s'agit de comparaisons a posteriori, c'est-à-dire qu'il n'y a pas d'hypothèses de départ sur les efficacités des produits testés. Les comparaisons statistiques ont été exécutées par le biais du test de Newman-Keuls. Ces tests ont permis de dégager les produits les plus intéressants pouvant être testés au champ.

#### □ Résultats et discussion de l'essai en laboratoire

##### ▪ Le test phytotoxicité

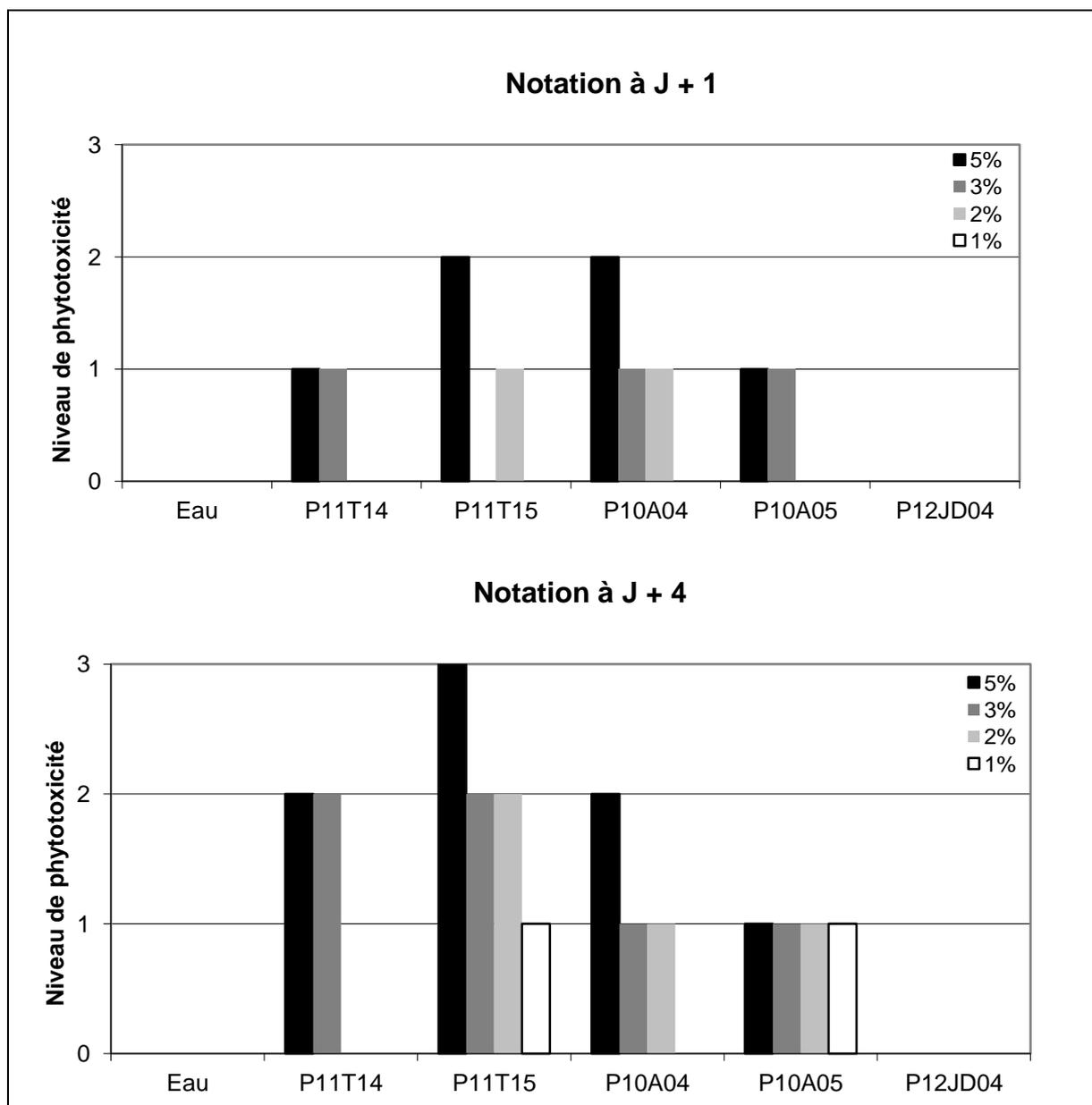
Résultats :



**Figure 22 : Exemples de symptômes de phytotoxicité observés sur des plants traités (Prises à Vegenov le 13/06/12 par Marie Cochennec) : A = nécroses de la face inférieure, B = nécroses de la face supérieure, C = jaunissement du cotylédon**

Pour les deux notations, le témoin Eau ne présente aucun symptôme de phytotoxicité.

Les symptômes observés à la notation J+1 sont essentiellement des nécroses sur les faces inférieures et supérieures des cotylédons, ou des jaunissements (cf. **Figure 22**). Ils restent relativement modérés pour l'ensemble des produits testés quelque soit la dose (cf. **Figure 23**).



**Figure 23 :Niveau de phytotoxicité observé sur les plants d’artichauts en fonction des produits SDP et de leur dose**

P12JD04 ne déclenche aucune phytotoxicité pour toutes les doses testées.

A la dose de 5%, P11T15 et P10A04 provoquent des symptômes avec un niveau de phytotoxicité atteignant 2 à J+1. Les plants traités avec P11T14 et P10A05 présentent eux aussi une phytotoxicité, plus légère (niveau 1) à cette même dose.

A 3%, P11T14, P10A04 et P10A05 déclenchent un niveau de phytotoxicité de l'ordre de 1 sur les plants d'artichaut.

A 2%, seuls P11T15 et P10A04 occasionnent des symptômes de phytotoxicité (niveau 1).

Ces symptômes sont absents pour toutes les modalités à la dose de 1%.

La notation J+4 confirme le fait que le niveau de phytotoxicité observé reste modéré pour les produits testés, dépassant rarement un niveau de 2.

Les plants traités au P12JD04 ne présentent toujours aucun symptôme.

Les phytotoxicités provoquées par P11T14 à partir de 3% sont plus marquées passant d'un niveau de 1 à 2.

De même, les plants traités avec P11T15 présentent des phytoses plus importantes aux quatre doses testées (un niveau de plus pour chacune des doses).

Pour P10A04, aucune évolution des symptômes n'a été relevée. La dose de 5% déclenche une phytotoxicité moyenne de 2 sur l'artichaut. Les doses de 3% et 2% restent faiblement phytotoxiques, seulement de 1.

Enfin, les symptômes provoqués par P10A05 évoluent légèrement aux doses de 1% et 2% en passant d'un niveau 0 à 1. Les deux autres doses, 3% et 5%, n'ont pas provoqué de symptômes plus marqués au terme des quatre jours.

### Discussion :

Pour les deux notations, les **symptômes de phytotoxicité sont restés assez modérés**, et n'ont pas détruits totalement les plants.

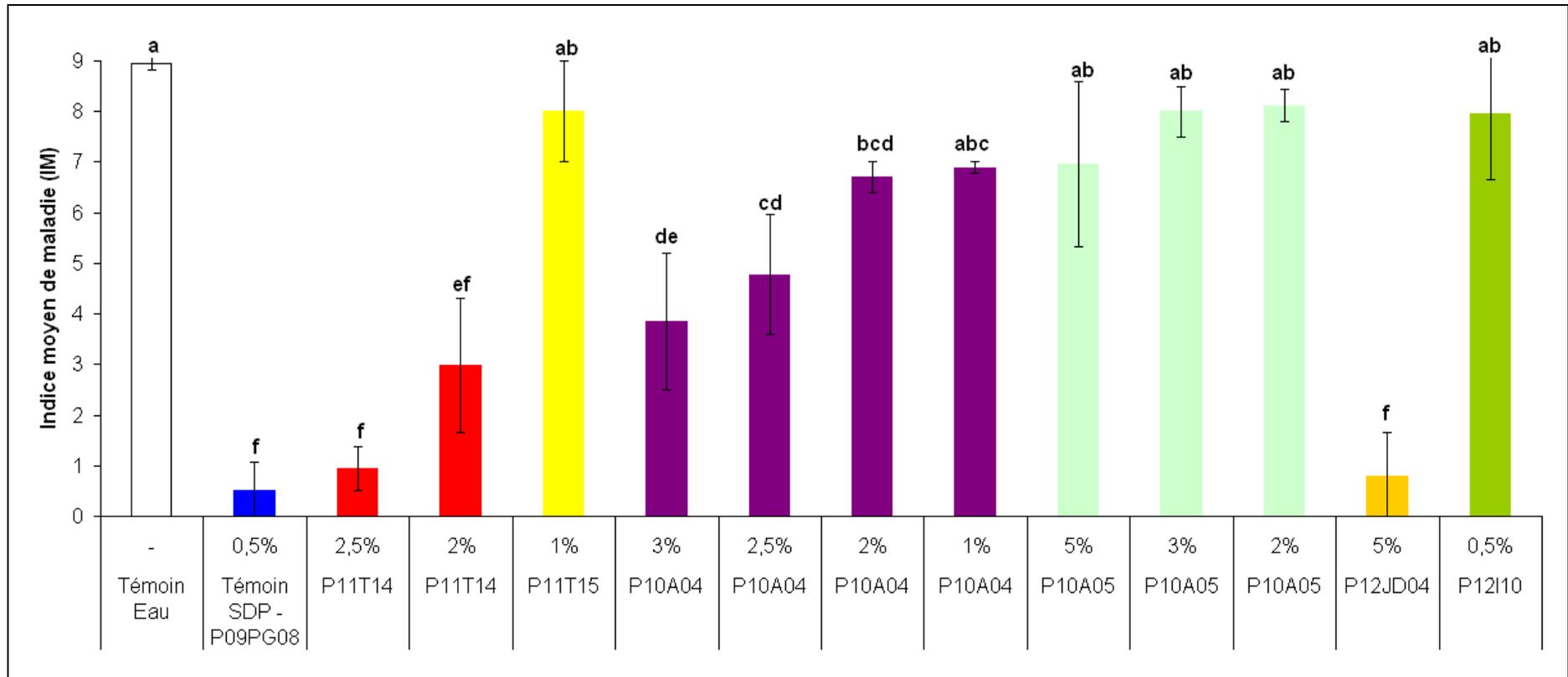
Le témoin Eau sert de référence sur l'aspect attendu des cotylédons en absence de traitement. La gamme de doses appliquée aurait pu être plus étoffée afin de choisir plus facilement la dose maximale à utiliser pour le test efficacité. En cas de doute, plusieurs doses ont donc été testées directement au test d'efficacité.

Le produit P11T15 n'a provoqué qu'une légère phytotoxicité à 1%. Cette dose a donc été choisie pour le test efficacité. Le produit P11T14 étant moins phytotoxique pour les plants d'artichaut, il a été testé aux doses plus fortes de 2% et 2,5%.

P10A04 a engendré une phytotoxicité de même niveau pour les doses de 2% et 3%. Ceci laisse penser que les symptômes observés sont peut-être dus aux conditions particulières de laboratoire. Les plants d'artichaut sont exposés par exemple à la lumière artificielle ce qui les fait sécher plus rapidement, ou alors ils ne sont pas forcément irrigués de manière homogène et continue. Pour connaître son efficacité, il a donc été décidé de tester quatre doses : 3%, 2,5%, 2% et 1%.

Le même raisonnement a été suivi pour P10A05 qui provoque un niveau de phytotoxicité de 1 pour les quatre doses testées. Il a ainsi été utilisé à 3% et 2% lors du test efficacité.

Pour P12JD04, la dose la plus forte (5%) a été retenue puisque aucune phytotoxicité n'a été constatée. De plus, du fait de sa réception tardive, il n'a pas été possible de réaliser une évaluation sur une gamme de concentration plus complète.



**Figure 24 :Indices moyens de maladie en fonction des produits SDP testés en laboratoire sur des plants d'artichaut inoculés par une souche de *B.lactucae* 4 jours après le traitement (les lettres représentent les groupes statistiques issus du test de Newman-Keuls)**

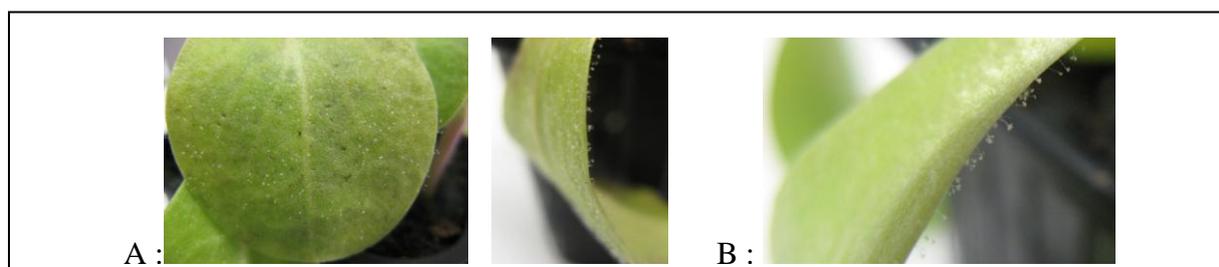
Enfin, il faut rappeler que pour le quatrième produit, P12I10, la dose optimale d'utilisation a été préconisée par le fabricant.

Au final, **voici les produits et leur dose d'application utilisés pour le test d'efficacité (14 modalités) :**

- **2 modalités Témoin : Eau et P09PG08 à 0,5%**
- **P11T15 à 1%**
- **P11T14 à 2,5% et 2%**
- **P10A04 à 3%, 2,5%, 2% et 1%**
- **P10A05 à 3% et 2%**
- **P12JD04 à 5%**
- **P12I10 à 0,50%**

▪ *Le test efficacité*

Résultats :

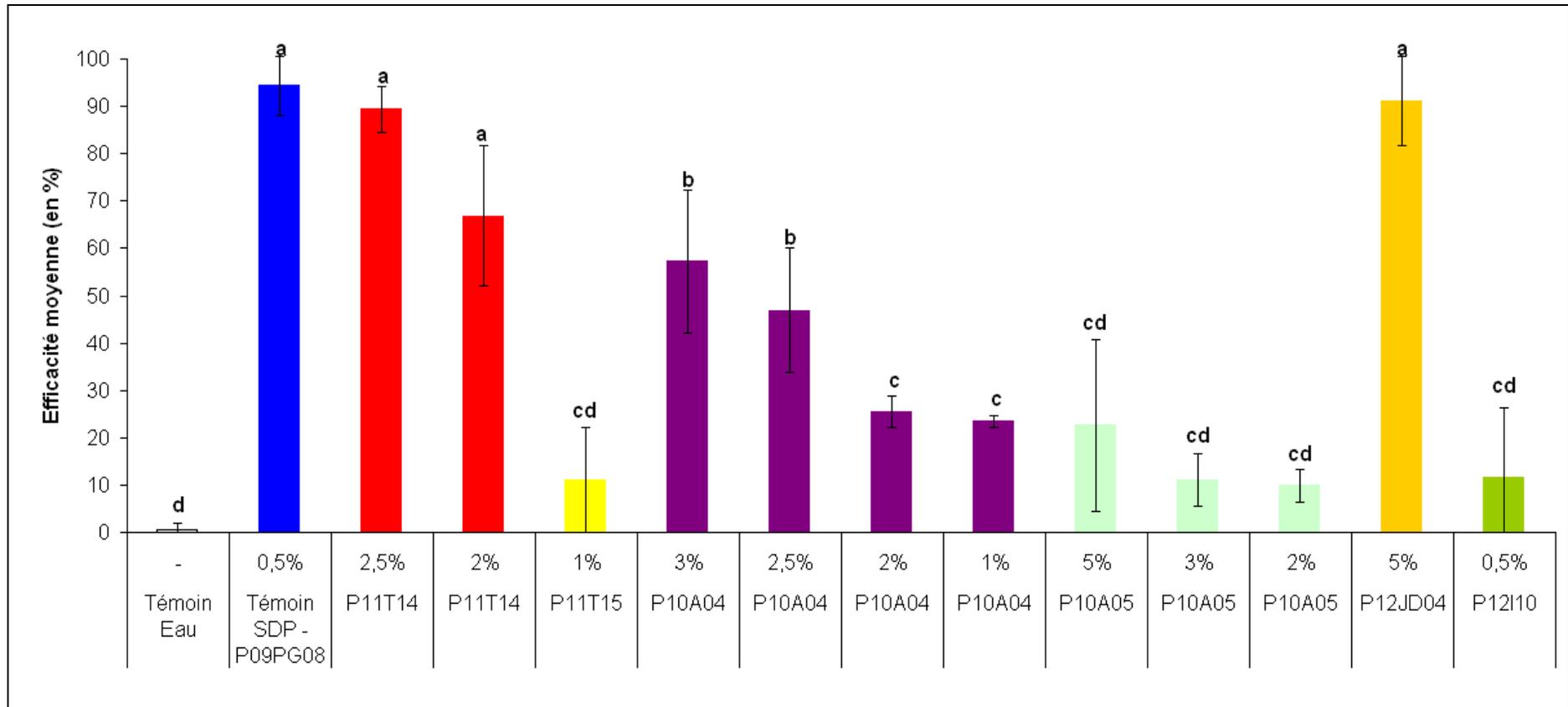


**Figure 25 : Exemples de développement de mildiou sur les plants d'artichaut : A = traitement à l'eau ; B = traitement au P12I10 (Prises à Vegenov le 28/06/12 par Marie Cochenec)**

Le témoin Eau montre un fort développement de mildiou (cf. **Figure 25**), l'indice moyen de maladie étant de 9. Au contraire, le témoin SDP, P09PG08, présente un indice de maladie très faible inférieur à 1 (0,51). Il permet de confirmer le fait que les expérimentations se sont déroulées de façons correctes, et que le produit protège efficacement les plants d'artichaut contre le mildiou. Par exemple, le P09PG08 permet de vérifier que le taux d'infestation de *B.lactucae* n'est pas excessif.

Dans nos conditions expérimentales, au vu des indices moyens de maladie (cf. **Figure 24 et tableau 4**), deux produits se démarquent de façon significative : P11T14 à 2,5% et P12JD04 à 5%. Leurs indices moyens de maladie sont tous les deux inférieurs à 1 (0,95 et 0,80), ce qui les rapproche du témoin SDP P09PG08. Le P11T14 à 2% obtient aussi un indice moyen de maladie correct de 2,98. Le P10A04 à 3% et 2,5% présentent des indices moyens de 3,85 et 4,78. Au niveau des doses plus faibles, les indices sont plus élevés, de 6,70 à la dose de 2%, et 6,89 à la dose de 1%.

Les autres produits, soit la gamme de P10A05, P11T15 à 1% et P12I10 à 0,5%, ont des indices moyens de maladie élevés se rapprochant de celui de l'eau.



**Figure 26 : Pourcentage d'efficacité moyenne par rapport à l'eau des produits SDP testés en laboratoire sur des plants d'artichaut inoculés par une souche de *B.lactucae* 4 jours après le traitement (les lettres représentent les groupes statistiques issus du test de Newman-Keuls)**

Ces évaluations de symptômes sont traduites en taux d'efficacité par rapport à l'eau.

Trois produits sont significativement plus efficaces que les autres (cf. **Figure 26 et tableau 4**). Il s'agit du P11T14 à 2,5% et à 2%, et du P12JD04 à 5% qui ont des pourcentages d'efficacité par rapport à l'eau de 89%, 67% et 91% ce qui est statistiquement semblable à l'efficacité obtenue avec le témoin SDP P09PG08 (94%).

Les deux modalités P10A04 à 3% et 2,5% sont légèrement moins efficaces par rapport aux trois produits précédents. Cependant, elles se différencient significativement des autres modalités testées, avec une efficacité respectivement de 57% et 47%.

Pour le reste des modalités, les efficacités sont toutes comprises entre 10% et 50%.

**Tableau 4 : Récapitulatif des résultats d'indice moyen de maladie (IM moyen) et d'efficacité moyenne (EF moyenne) pour les produits testés en laboratoire**

Code Produit	Dose	IM moyen	Ecart-type IM	Test de Newman-Keuls	EF moyenne (en %)	Ecart-type EF	Test de Newman-Keuls
Témoin Eau	-	8,95	0,13	a	0,56	1,47	d
Témoin SDP – P09PG08	0,5%	0,51	0,56	f	94,33	6,27	a
P11T14	2,5%	0,95	0,43	f	89,44	4,82	a
P11T14	2%	2,98	1,33	ef	67	14,77	a
P11T15	1%	8,00	1,00	ab	11	11,11	cd
P10A04	3%	3,85	1,35	de	57	15,00	b
P10A04	2,5%	4,78	1,18	cd	46,94	13,16	b
P10A04	2%	6,70	0,30	bcd	25,56	3,33	c
P10A04	1%	6,89	0,11	abc	23,46	1,23	c
P10A05	5%	6,97	1,63	ab	22,59	18,15	cd
P10A05	3%	8,00	0,50	ab	11,11	5,56	cd
P10A05	2%	8,11	0,31	ab	9,84	3,49	cd
P12JD04	5%	0,80	0,85	f	91,11	9,43	a
P12I10	0,5%	7,95	1,31	ab	11,67	14,52	cd

#### Discussion :

Tout d'abord, il faut noter qu'il y a **un effet dose pour l'ensemble des produits**. La dose la plus forte employée est toujours la plus efficace quelque soit le produit.

Ensuite, les résultats font ressortir **trois produits qui sont potentiellement intéressants** au niveau des tests en laboratoire : **le P11T14, le P12JD04 et le P10A04**.

Les doses qui semblent les plus efficaces pour ces produits sont :

- **2,5% pour le P11T14.** Cette dose était la plus forte évaluée en efficacité, mais aussi la plus efficace.

- **5% pour le P12JD04.** Il faut cependant noter que finalement, après un délai assez long (10 jours après traitement), des **symptômes de phytotoxicité sont apparus**. Il a donc été décidé de **diminuer la dose à 3%** pour l'application au champ, même si le risque d'avoir de la phytotoxicité est plus faible qu'en laboratoire. En effet, les plants d'artichaut de plein champ ont des cuticules plus épaisses que des plants semés en conditions contrôlés, notamment parce qu'ils ont subi plus de stress dû à l'environnement extérieur. Des raisons économiques justifient également une diminution de la dose. A 5%, ceci ne peut pas être viable économiquement pour un producteur.

- **2,5% pour le P10A04.** Ce troisième produit a conduit à une protection intéressante, même si elle est inférieure aux deux premiers produits. Il a donc été sélectionné pour les essais de plein champ.

En effet, sur beaucoup de produits testés, très peu semblent prometteurs pour une utilisation au champ. Au champ, les conditions climatiques sont différentes de celles en laboratoire. Les plants en laboratoire sont dans des conditions très contrôlées ce qui permet d'avoir un seul stress à la fois (ici, le mildiou). En plein champ, les plants d'artichaut subissent plusieurs stress en même temps (stress abiotiques et biotiques). L'efficacité peut donc être très différente au champ. Un produit qui est très efficace en laboratoire, peut devenir peu efficace au champ. Le contraire est aussi vrai. A Vegenov, plusieurs études sont menées sur ce sujet sur différents couples hôtes/pathogènes (Monot, 2012).

Les expérimentations menées en plein champ auront pour but de valider ou non les résultats obtenus en laboratoire pour les trois produits. **Elles seront mises en place au niveau de la station de CATE pour les trois modalités suivantes :**

- **le P11T14 à 2,50%**
- **le P12JD04 à 3%**
- **le P10A04 à 2,50%**

### 3) Essai en plein champ des stimulateurs de défense sélectionnés

#### □ **Objectifs de l'essai**

L'objectif principal de cet essai est de connaître l'efficacité des trois produits sélectionnés suite aux tests en laboratoire en conditions réelles de plein champ.

#### □ **Protocole expérimental**

L'essai a été mis en place au CATE. La parcelle a eu comme précédent cultural de l'avoine en engrais vert. Un apport de 30 tonnes/ha de fumier de bovins a été effectué. La plantation de drageons de la variété 'Castel' a eu lieu le 16/05/2012 avec une densité de 10 000 pieds par hectare. Un seul désherbage chimique a été réalisé avec de l'EMIR (Oxyfluorène + Propyzamide) à 1,4 L/ha le 21/05/2012.

P12JD04	Témoin	Rhodax
P11T14	P12JD04	Témoin
P10A04	Rhodax	P11T14
Témoin	P11T14	P10A04
Rhodax	P10A04	P12JD04

N  
▲

**Figure 27 : Plan d'expérience pour l'essai des SDP en plein champ avec cinq modalités répétées trois fois : modalité 'Témoin' (sans traitement), modalité 'Rhodax' (traitement au Rhodax), modalité P10A04, modalité P11T14 et modalité P12JD04**

Cinq modalités ont été mises en place dans cet essai (cf. **Figures 27 et 28**) :

- un témoin sans aucun traitement anti-mildiou, noté modalité 'Témoin'
- un témoin chimique traité au RHODAX (phosphite), noté modalité 'Rhodax'
- le P11T14 à 2,50%, noté modalité 'P11T14'
- le P12JD04 à 3%, noté modalité 'P12JD04'
- le P10A04 à 2,50%, noté modalité 'P10A04'

Les traitements ont été effectués au mieux tous les 10 jours en fonction des conditions climatiques. La dose appliquée est de 600L/ha pour chaque modalité.

L'unité expérimentale a une surface de 20m<sup>2</sup>. La répartition des modalités suit un dispositif en bloc à 3 répétitions.

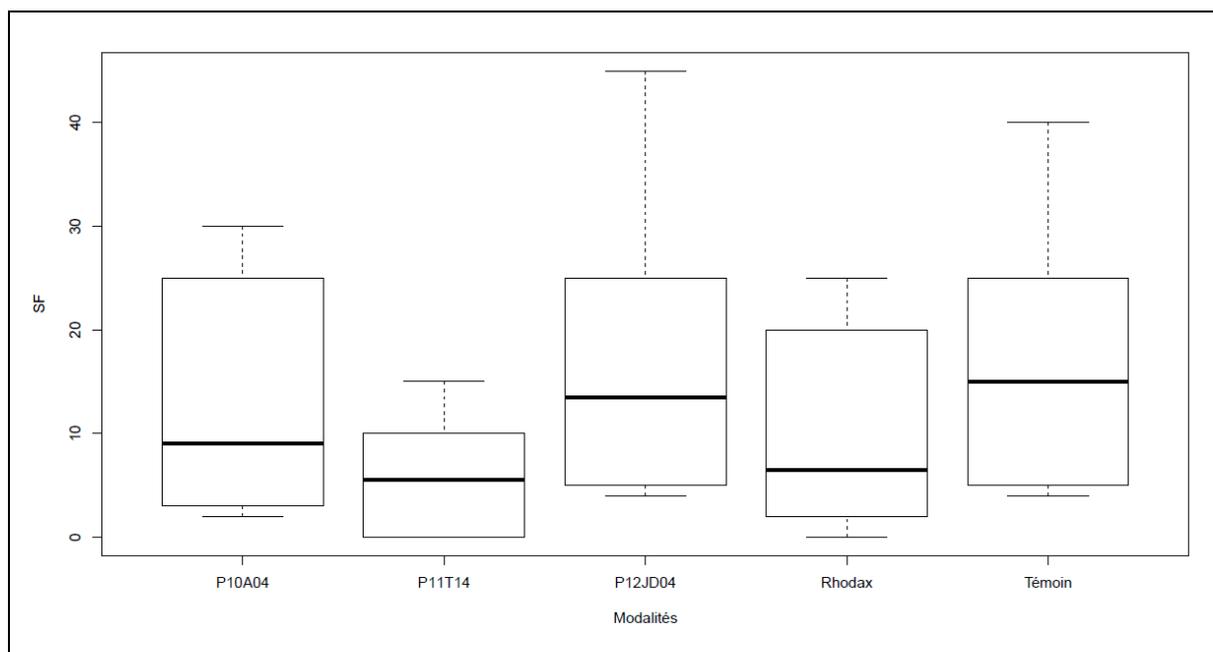
Les notations ont été réalisées toutes les semaines par deux observateurs. Il s'agissait de noter le pourcentage de surface foliaire touchée par le mildiou (notée SF) dans l'ensemble d'une unité expérimentale. C'est donc un pourcentage moyen.

Lors des notations, les observateurs ne savent pas quelle modalité ils sont en train d'évaluer. Ceci permet d'être plus objectif.



**Figure 28** : Photographie de la parcelle de l'essai en plein champ des SDP située au CATE (station expérimentale du Nord Finistère) (Prise à St Pol de Léon le 16/07/12 par Marie Cochenec)

*Remarque* : Tous les résultats n'ont pas pu être pris en compte dans ce rapport à cause des dates de stage. Seules les premières notations étaient disponibles. Elles ont permis de donner des tendances, notamment par rapport à ce qui avait été observé au laboratoire. En conséquence, aucune analyse statistique n'a pu être réalisée. Seulement un graphique a pu être exécuté avec le logiciel R.



**Figure 29 : Pourcentage moyen de surface foliaire (SF) touchée par le mildiou en fonction des modalités (boîtes de dispersion réalisées avec les résultats disponibles)**

**Tableau 5 : Récapitulatif des pourcentages moyens de surface foliaire touchée par le mildiou pour les trois modalités testées en plein champ**

Modalités	% moyen de SF	Ecart-type
Témoin	17,33	2,94
Rhodax	10,00	2,50
P10A04	13,00	2,88
P11T14	6,00	0,94
P12JD04	17,67	4,78

### □ Résultats de l'essai en plein champ

Les boîtes de dispersion (cf. **Figure 29**) montrent que les modalités ne peuvent pas être départagées de façon significative. Cependant, quelques tendances peuvent être dégagées.

Sur le témoin, il a été observé 17% de surface foliaire touchée par le mildiou (cf. **Tableau 5**). *B.lactucae* était donc bien présent sur la parcelle. Le P11T14 à 2,50% semble avoir une efficacité légèrement supérieure au RHODAX avec 6,00% de la surface foliaire touchée contre 10,00% pour le RHODAX. De même, le P10A04 à 2,50% a une efficacité quelque peu inférieure (13,00%) à celle du RHODAX. En revanche, le P12JD04 a une efficacité moindre (17,67%) se rapprochant du témoin (17,33%).

### □ Discussion sur les stimulateurs de défense

**Tous les résultats n'étant pas disponibles, seules des tendances ont pu être dégagées.** Deux notations ont pu être prises en compte ici (le 01/08/2012 et le 14/08/2012).

Au moment de la première notation début Août, les conditions climatiques n'ont pas favorisé le développement du mildiou sur les drageons. Les observations ont donc été plus difficiles. A la seconde notation, les symptômes de mildiou étaient bien plus visibles. Ces dernières notations sont donc plus fiables.

Les résultats de l'essai en plein champ confirment certains résultats obtenus en laboratoire.

**Pour le P11T14 à 2,5%, l'efficacité au champ semble très intéressante puisqu'elle semble meilleure que le RHODAX.**

Le **P10A04 à 2,5%** avait montré une efficacité moyenne contre le mildiou en laboratoire (46,94% d'efficacité par rapport à l'eau). L'essai au champ a confirmé ce constat. En effet, ce produit a une **efficacité légèrement inférieure à celle du RHODAX, mais supérieure au témoin**. Les prochaines notations confirmeront ou non cette tendance pour le P10A04.

Enfin, pour le **P12JD04 à 3%**, en laboratoire, l'efficacité était très intéressante (91,11 % d'efficacité par rapport à l'eau). Mais au champ, ce produit ne s'est pas révélé aussi radical contre le mildiou. Son **efficacité se rapproche de celle du témoin**.

**Le mode d'action des différents produits testés ici ne sont pas connus.** En effet, les entreprises fabricantes ne communiquent pas cet aspect. Il est donc complexe de savoir réellement comment fonctionnent ces produits et pourquoi des différences de résultats existent entre les essais en laboratoire et ceux du plein champ.

Beaucoup de facteurs entrent en jeu en plein champ. Les **conditions agro-environnementales** au moment de l'application du SDP ainsi que **l'état dans lequel se trouve la plante** sont primordiaux pour la réussite du traitement. Tous les stress subi par la plante interagissent entre-eux ce qui rend complexe son étude. Ceci peut expliquer pourquoi le P12JD04 est nettement moins efficace en plein champ qu'en laboratoire. C'est pourquoi il est toujours recommandé d'**associer les SDP à d'autres stratégies de protection**, notamment celles qui font appel à des outils d'aide à la décision, comme par exemple le modèle MILART (Pajot, 2010).

Actuellement, **peu de recherches fondamentales sont effectuées sur le mildiou de l'artichaut**, notamment parce qu'il s'agit d'un problème très régional. Pour trouver un stimulateur de défense efficace, il faudrait, avant tout, bien connaître tous les mécanismes mis en place lors de l'infestation de l'artichaut par *B.lactucaae*.

Pour l'instant, seuls quelques parallèles peuvent être faits avec le mildiou de la laitue, beaucoup plus à l'étude. Ainsi, il a été montré que les phénols et les phytoalexines permettaient de réduire significativement le développement du mildiou sur la laitue (Lebeda *et al.*, 2001). De même, l'acide aminé BABA (acide aminé  $\beta$ -aminobutyrique) a aussi une action intéressante de protection contre ce pathogène (Pajot *et al.*, 2001). Certains projets sont menés sur l'efficacité des stimulateurs de défense pour le couple laitue / *B.lactucaae* (Amiriaux, 2010).

Pour les produits contenant des **phosphites**, les essais montrent que ces molécules permettent une **bonne protection contre le mildiou de l'artichaut**. Il est nécessaire de comprendre pourquoi ces molécules sont efficaces contre *B.lactucaae*. Pour certains phosphites, certains mécanismes ont pu être mis en évidence. Par exemple, le  $H_3PO_3$  régulerait la protéine kinase MPK4 et les réponses de défense déclenchée par la réaction due à l'acide salicylique (Saindrenan *et al.*, 2012). En ce qui concerne l'artichaut, aucune étude approfondie sur ce sujet n'a été réalisée.

Le **P11T14 contient des phosphites** ce qui pourrait expliquer qu'il est efficace contre le mildiou de l'artichaut. Ce produit est même plus intéressant que le RHODAX qui contient 26% de mancozèbe et 44% de fosétyl-Al (Ministère de l'Agriculture, 2012). Cette dernière molécule est un phosphite provenant de la réaction entre l'acide phosphonique et l'éthanol (Viguès, Aveline, 2011). La composition exacte de P11T14 en phosphite n'a pas été communiquée par l'entreprise fabricante. Il serait intéressant de savoir si l'action des phosphites contenus dans le produit prédomine celle du stimulateur de défense. Dans le cas contraire, il faudrait approfondir la connaissance du mécanisme de défense stimulé par le P11T14.

## Perspectives

---

Aujourd'hui, la protection contre le mildiou de l'artichaut nécessite la mise en place de nouvelles stratégies. Parmi ces nouvelles prospections, le modèle MILART représente une bonne alternative. **Le travail sur les données accumulées depuis 2008 a permis d'ajuster les paramètres de MILART, puis de le valider sur l'année 2012 pour l'émission des dates d'alerte.** Ce modèle est donc un bon outil d'aide à la décision pour les producteurs et les conseillers. Ceci a été confirmé par l'essai mis en place au CATE (station expérimentale du Nord Finistère) comparant les stratégies de protection contre le mildiou. Il est important que le modèle soit couplé aux observations de terrain pour aboutir à une décision juste.

**Pour le calcul de la première sporulation, le modèle ne peut pas être validé.** Ceci doit être mis en relation avec la **difficulté d'évaluer sur le terrain la quantité d'inoculum primaire.** Aucune connaissance fondamentale sur la conservation de *Bremia lactucae* dans les cultures d'artichaut n'est disponible à ce jour. Ce manque d'informations fait que le modèle se base sur l'hypothèse que le mildiou de l'artichaut fonctionne comme les autres mildious (laitue, pomme de terre). Or les cycles culturaux étant différents, il est normal de penser que sur l'artichaut, ce pathogène n'a pas le même comportement, surtout au niveau de sa conservation.

En plus de devoir améliorer les prédictions de première sporulation, l'aspect fonctionnel et pratique doit aussi être validé. Pour cela, il sera nécessaire de le faire tester par des utilisateurs. Ce sont les deux prochaines étapes envisagées pour l'année prochaine.

**Le modèle MILART doit en parallèle être associé à d'autres stratégies,** notamment l'utilisation de stimulateurs de défense des plantes (SDP).

Suite aux essais menés en laboratoire, **trois SDP ont montré un intérêt avec des taux d'efficacité par rapport à l'eau élevés : le P11T14 à la dose de 2,5%, le P12JD04 à 3% et le P10A04 à 2,50%.**

Les essais au champ sont au premier abord plus mitigés. Bien que le **P11T14 et le P10A04 semblent aussi efficaces dans les conditions de plein champ qu'en laboratoire, le P12JD04 n'a pas donné les résultats attendus.** Pour le P11T14, la composition contenant des phosphites, il était normal de penser qu'il serait efficace. Pour le P10A04 qui est réellement un stimulateur de défense, les résultats semblent prometteurs. Si ce produit est couplé aux prévisions de MILART, la protection contre le mildiou peut être satisfaisante. Il faudrait tester ce type de stratégies en expérimentations de plein champ pour être sûr de l'efficacité contre le mildiou de l'artichaut.

Cependant, il faut garder à l'esprit que tous les résultats n'étaient pas disponibles. Les stades phénologiques les plus sensibles de l'artichaut n'arriveront que fin Août / début Septembre. Ce n'est qu'à ce moment-là que l'efficacité des trois produits testés pourra être réellement évaluée. Les résultats vont être communiqués aux différentes entreprises fabricantes. Elles pourront alors s'engager dans une démarche de commercialisation ou non au vu des essais menés au laboratoire et au champ.

En ce qui concerne les démarches d'homologation de stimulateurs de défense, il devient nécessaire de faire évoluer la réglementation sur cet aspect. Les produits de stimulation de défense des plantes doivent normalement suivre la même procédure que celle pour les produits phytosanitaires. Mais le problème est que bien souvent, les produits d'origine naturelle (dont des SDP) sont commercialisés par de petites sociétés n'ayant pas les moyens financiers pour entamer une démarche d'homologation. C'est pourquoi elles préfèrent vendre sous forme d'engrais (procédure moins coûteuse) en ajoutant la mention « Stimule les défenses des plantes ».

En conséquence, sur le marché, toutes sortes de produits revendiquent une action de stimulation de défense sans pour autant en avoir effectivement une. Ceci nuit à l'image de véritables SDP, dont l'efficacité a été prouvée. Ceci pourrait être clarifié en créant une catégorie, pour les stimulateurs de défense et les produits peu préoccupants, bien distincte des autres produits phytosanitaires. La procédure pourrait être allégée pour cette catégorie. Cependant, un problème persiste. Il faut s'assurer que ces substances dites d'origine naturelle et les stimulateurs de défense n'aient pas d'effets toxiques ou écotoxiques.

Par ailleurs, le **mode d'action des stimulateurs de défense reste peu clair sur l'artichaut**. Là encore, une étude plus approfondie sur le cycle de développement du mildiou de l'artichaut pourrait permettre de connaître les voies métaboliques les plus efficaces contre ce pathogène. La recherche de certains SDP serait alors plus efficace puisqu'il serait alors possible de cibler ceux qui ont une action souhaitée.

Suite à ce travail, il serait intéressant de **proposer un sujet de thèse pour approfondir toutes les connaissances fondamentales sur le couple artichaut/*Bremia lactucae***. Il s'agit de mieux comprendre le cycle de développement du mildiou sur l'artichaut afin d'optimiser la protection des cultures. Ces connaissances permettraient d'améliorer le modèle MILART. La compréhension de la conservation de *Bremia lactucae* d'une année sur l'autre est nécessaire pour quantifier l'inoculum primaire et mieux prédire les premières sporulations via le modèle. Ce travail pourrait aussi porter sur les actions des SDP sur l'artichaut et quelles voies métaboliques sont concernées. Par exemple, les phosphites se révèlent efficaces en plein champ, mais le mécanisme d'action n'est pas connu ou reste flou. Ceci pourrait rendre la sélection des stimulateurs de défense plus efficace.

Ensuite, **pour les SDP qui ont été testé cette année en plein champ, un deuxième essai en plein champ serait nécessaire**. Il s'agit surtout d'acquérir plus de données, et de s'affranchir de l'impact des conditions agro-environnementales.

Enfin, le **modèle MILART doit maintenant être testé avec des producteurs**. Un essai comme celui mené au CATE (comparaison d'une stratégie conventionnelle et d'une stratégie de conduite avec le modèle) devrait être mis en place de nouveau l'année prochaine. Il peut aussi être envisagé d'élargir la zone géographique d'application du modèle. Il serait intéressant de collaborer avec d'autres stations expérimentales afin de voir comment se comporte le modèle dans d'autres situations. Ceci est déjà en cours avec la station expérimentale SECL de Pleumeur-Gautier dans les Côtes d'Armor.

Suite à ce travail, les techniques de protection des cultures d'artichaut contre le mildiou vont pouvoir être améliorées avec le modèle MILART. A plus long terme, les stimulateurs de défense des plantes pourront être associés à cette démarche. La conception et la validation de MILART a permis d'acquérir une méthodologie qui pourra être réutilisée pour d'autres modèles. Ainsi, le principe de modélisation épidémiologique va pouvoir être étendu à d'autres cultures de la zone légumière du Léon.

## Références bibliographiques

---

- Amiriaux, C. (2010). Les SDP en cultures légumières : enjeux et bilan des essais en plein champ. Les XVI Rencontres Professionnelles « les Stimulateurs des défenses naturelles en production végétale : mythe ou réalité ? », Colmar, 8 Décembre 2010, 17p.
- Blancard, D., Lot, H., Maisonneuve, B. (2003). Maladies des salades : identifier, connaître et maîtriser. INRA Editions, Paris, 375p.
- Carisse, O., Philion, V. (2002). Meteorological factors affecting periodicity and concentration of airborne spores of *Bremia lactucae*. The Canadian Journal of Plant Pathology, 24 (2): 184-193
- Casadebaig, P. (2009). Modéliser les interactions entre développement de la plante, architecture du couvert et épidémies de maladies fongiques aériennes. Intervention au séminaire « Modélisation pour la protection intégrée des cultures », 12p.
- Collet, J.M. (2010). Artichaut 2010 : lutte contre le mildiou, essai de produits alternatifs. Compte-rendu d'expérimentations, CATE-Ctifl, Saint Pol de Léon, 5p.
- De Visser, C.L.M. (1998). Development of a downy mildew advisory model based on downcast. European Journal of Plant Pathology 104, pp. 933-943
- Divoux, R. (1963). La détermination des dates de traitements dirigés contre le mildiou de la pomme de terre. Bulletin technique d'information des ingénieurs des services agricoles, n°180, pp. 315-342
- Duvauchelle, S. (1992). Le mildiou de la pomme de terre *Phytophthora infestans* : aperçu des connaissances, SRPV Nord Pas-de-Calais, 68p.
- FranceAgrimer, (2010). Les filières des fruits et légumes : données 2010. Les cahiers de FranceAgrimer, 88p.
- Friedrich, S. *et al.* (2003). Development of ZWIPERO, a model forecasting sporulation and infection periods of onion downy mildew based on meteorological data. European Journal of Plant Pathology, vol.109, n°1, pp.35-45
- Göker, M. *et al.* (2006). How do obligate parasites evolve? A multi-gene phylogenetic analysis of downy mildews. Fungal Genetics and Biology 44, pp.105-122
- Janvier, C. *et al.* (2008). Le mildiou de la laitue : état des lieux et perspectives. Infos-Ctifl, n°243, pp.34-38
- Kamoun, S. *et al.* (1999). Resistance to oomycetes: a general role for the hypersensitive response. Plant Science, 4 (5): 196-200
- Kelderer, M., Gramm, D. (2008). L'usage des phosphites en agriculture biologique. Journées techniques Viticulture biologique, Die, 26 et 27 Novembre 2008, 17p.
- Klarzynski, O., Fritig, B. (2001). Stimulation des défenses naturelles des plantes. Académie des Sciences Paris, Life Science, n°324, pp.953-963
- Kushalappa, A.C. (2001). BREMCAST: Development of a system to forecast risk levels of downy mildew on lettuce (*Bremia lactucae*). International Journal of Pest Management, vol.47, n°1, pp.1-5
- Lebeda, A. *et al.* (2002). Aspects of the interactions between wild *Lactuca spp.* and related genera and lettuce downy mildew (*Bremia lactucae*). P.T.N. Spencer-Phillips *et al.* (eds), Advances in Downy Mildew Research, pp.85-117

- Lebeda, A. *et al.* (2001). Host-parasite specificity and defense variability in the *Lactuca spp.* - *Bremia lactucae* pathosystem. *Journal of Plant Pathology*, 83 (2) Special issue: 25-35
- Lepoivre, P. (2003). *Phytopathologie : bases moléculaires et biologiques des pathosystèmes et fondements des stratégies de lutte*. Editions De Boeck, 427p.
- Menard, V. (2007). La résistance de l'artichaut au mildiou : un axe prioritaire du programme de création variétale mené à l'OBS. *A&D*, n°91, pp.2-5
- Messiaen, C.M. *et al.* (1991). *Les maladies des plantes maraîchères*. Editions INRA « Du labo au terrain », 552p.
- Mezencev, N. *et al.* (2011). Outils télématiques et développement agricole. Intervention aux « Rencontres du végétal », 1p.
- Mezencev, N. (2008). Développement d'un outil télématique de prévision des risques du mildiou de l'artichaut. In : *Réseaux et expérimentations Artichauts 2008*, Chambre d'Agriculture du Finistère, Saint Pol de Léon, pp.21-27
- Monnet, Y. *et al.* (2002). MILONI : modèle prédictif des risques de mildiou de l'oignon. Intervention à la 2<sup>ème</sup> conférence internationale sur les moyens alternatifs de lutte contre les organismes nuisibles aux végétaux, Lille, 4-7 Mars 2002, 17p.
- Monot, C., Collet, J.M., Mezencev, N. (2011). Modélisation du mildiou de l'artichaut (*Bremia lactucae*). AFPP, Quatrième conférence internationale sur les méthodes alternatives en protection des cultures, Lilles, 8-10 Mars 2011, 9p.
- Monot, C. *et al.* (2006). Integrated management programme of artichoke downy mildew in Brittany. Poster scientifique.
- Natali, A. (2008). Phosphites, phosphates, phosphonates, acide phosphoreux, acide phosphonique, acide phosphorique, ethyl-phosphonate-foséthyl... Quelle confusion ! Journées techniques Viticulture biologique, Die, 26 et 27 Novembre 2008, 9p.
- Pajot, E. (2010). Stimulateurs des défenses naturelles des plantes : état des lieux et perspectives de recherche et développement pour sécuriser leur efficacité sur le terrain. Les XVI Rencontres Professionnelles « les Stimulateurs des défenses naturelles en production végétale : mythe ou réalité ? », Colmar, 8 Décembre 2010, 46p.
- Pajot, E. *et al.* (2001). PhytoGard and DL-β-amino Butyric Acid (BABA) induce resistance to downy mildew (*Bremia lactucae*) in lettuce (*Lactuca sativa L.*). *European Journal of Plant Pathology*, 107, pp. 861-869
- Perennec, S. (2011). Artichaut. Fiche technique de la chambre d'agriculture du Finistère, 11p.
- Pitrat, M. *et al.* (2003). *Histoires de légumes : des origines à l'orée du XXI<sup>e</sup> siècle*. INRA Editions, 410p.
- Rakotonindraina, T. (2008). Analyse de l'adaptabilité de SIPPOM, modèle de gestion durable des résistances variétales, au mildiou de la pomme de terre. Mémoire de fin d'études, 76p.
- Rapilly, F. (1991). *L'épidémiologie en pathologie végétale : mycoses aériennes*. Editions Quae, INRA, Paris, 318p.
- Rouzet, J. (2008). Modélisation pour la protection raisonnée : approches développées par la Protection des Végétaux. Intervention au séminaire « Modélisation pour la protection raisonnée », Paris, 21 Mai 2008, 44p.
- Rouzet, J., Pueyo, C. (2006). Modèles de prévision et conseil phytosanitaire : bilan des modèles en France, aperçu américain et perspectives. *Phytoma* n°591, pp.32-36

- Rouzet, J., Languier, M. (1997). Lutte raisonnée : les différents apports des modèles de prévision selon les parasites et les cultures. ANPP, Cinquième conférence internationale sur les maladies des plantes, Tour, 3-5 Décembre 1997, pp.47-54
- Saindrenan, P. *et al.* (2012). Dissection of the phosphate-induced priming in *Arabidopsis* infected with *Hyaloperonospora arabidopsidis*. *Plant Physiology*, pp.112.194647
- Scherm, H., Van Bruggen, A.H.C. (1995). Concurrent spore release and infection of lettuce by *Bremia lactucae* during mornings with prolonged leaf wetness. *Phytopathology*, vol. 85, pp. 552-555
- Scherm, H., Van Bruggen, A.H.C. (1994). Weather variables associated with infection of lettuce by downy mildew (*Bremia lactucae*) in coastal California. *The American Phytopathological Society*, vol.84, n°8, pp. 860-865
- Scherm, H., Van Bruggen, A.H.C. (1994). Global warming and nonlinear growth: how important are changes in average temperatures? *The American Phytopathological Society*, vol.84, n°12, pp. 1380-1384
- Serrurier, M., *et al.* (2010). *Mémento des fruits et légumes*. Editions Ctifl, 479p.
- Smith, I.M. *et al.* (1988). *European handbook of plant disease*, Blackwell Scientific Publications, 583p.
- Su, H. *et al.* (2004). Sporulation of *Bremia lactucae* affected by temperature, relative humidity, and wind in controlled conditions. *Phytopathology*, vol.94, pp.396-401
- Su, H. *et al.* (2000). Spore release of *Bremia lactucae* on lettuce is affected by timing of light initiation and decrease in relative humidity. *Phytopathology*, vol.90, pp.67-71
- Tchervenivanova, E. (1995). Development of a model to predict sporulation of *Bremia lactucae* in lettuce. Thesis, National Library of Canada, 94p.
- Van Maanen, A., Xu, X.-M. (2003). Modelling plant disease epidemics. *European Journal of Plant Pathology*, vol.109, n°7, pp.669-682
- Viguès, V., Aveline, N. (2011). Que valent vraiment les phosphites du marché ? *Bulletin d'information de l'IFV Sud-ouest* n°83, pp.2-4
- Voglmayr, H. *et al.* (2004). Phylogenetic relationships of *Plasmopara*, *Bremia* and other genera of downy mildew pathogens with pyriform haustoria based on Bayesian analysis of partial LSU rDNA sequence data. *The British Mycological Society*, vol.108, n°9, pp. 1011-1024
- Weber, R.W.S. *et al.* (1997). Teaching techniques for mycology : *Bremia lactucae*. *Mycologist*, vol. 11, part 4, pp. 146-149
- Wu, B.M. *et al.* (2002). Incorporation of temperature and solar radiation thresholds to modify a lettuce downy mildew warning system. *Phytopathology*, 92 (6): 631-636
- Wu, B.M. *et al.* (2001). Validation of weather and leaf wetness forecasts for a lettuce downy mildew warning system. *The Canadian Journal of Plant Pathology*, 23 (4): 371-383
- Wu, B.M. *et al.* (2000). Factors affecting the survival of *Bremia lactucae* sporangia deposited on lettuce leaves. *Phytopathology*, 90 (8): 827-833

## **Communications personnelles**

---

Buck-Sorlin, G. (2012). Communication personnelle. Professeur à l'Institut de recherche en horticulture et semences, Agrocampus Ouest à Angers.

Collet, J.M. (2012). Communication personnelle. Ingénieur au CATE, station expérimentale du Nord Finistère à Saint Pol de Léon.

Mezencev, N. (2012). Communication personnelle. Ingénieur à la chambre d'agriculture du Finistère à Saint Pol de Léon.

Monot, C. (2012). Communication personnelle. Assistante ingénieur en pathologie végétale à Vegenov à Saint Pol de Léon.

Pérennec, S. (2012). Communication personnelle. Ingénieur à la chambre d'agriculture du Finistère à Saint Pol de Léon.

## **Références sitographiques**

---

GEVES (page consultée le 30/03/12). Catalogue officiel.

<http://cat.geves.info/page/ListeNationale>

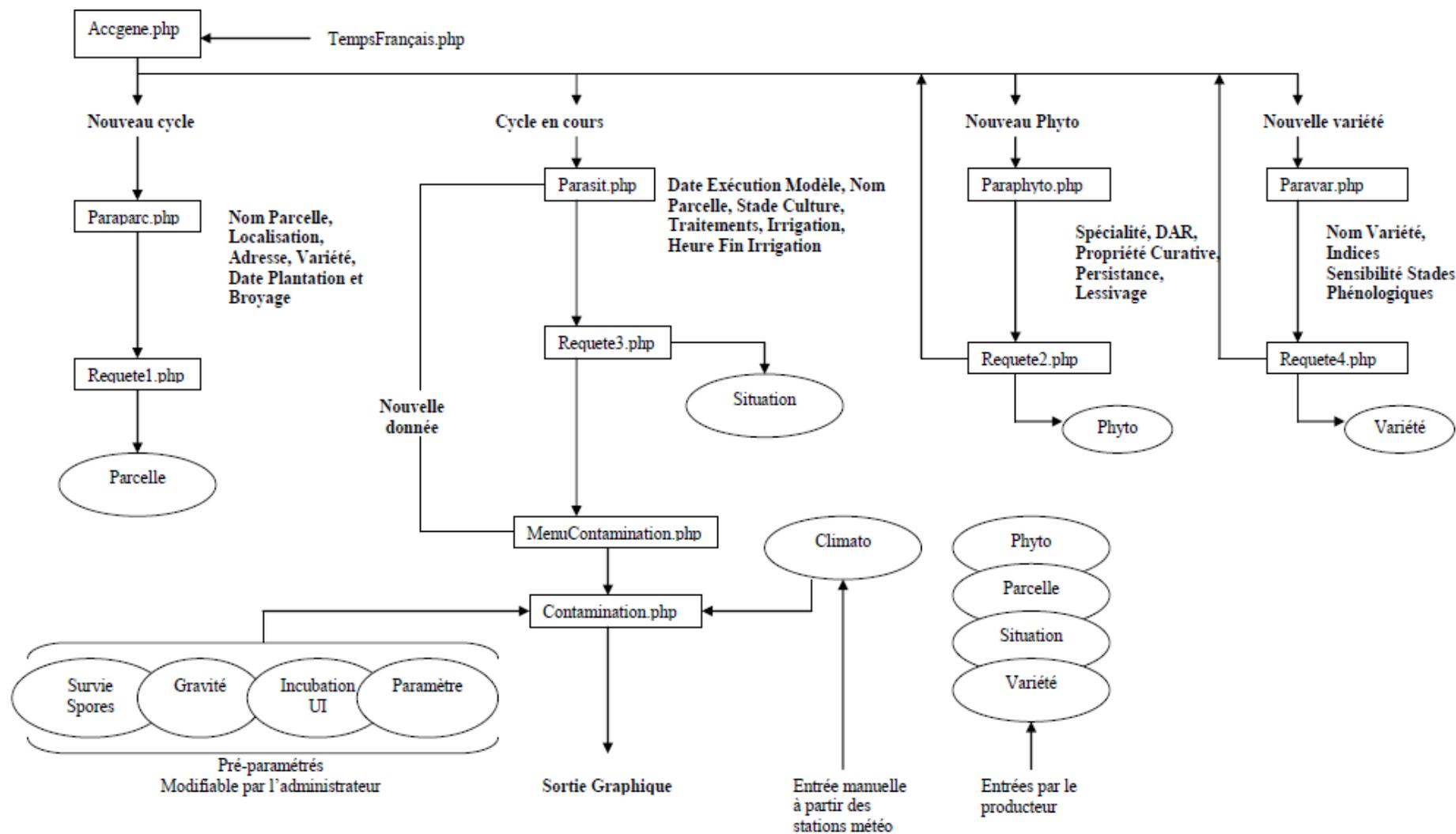
FAO (page consultée le 25/04/12). FAO Stats. <http://faostat.fao.org/>

Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche, de la Ruralité et de l'Aménagement du territoire (page consultée le 10/04/12). Ecophyto 2018.

<http://agriculture.gouv.fr/Ecophyto-Kesako>

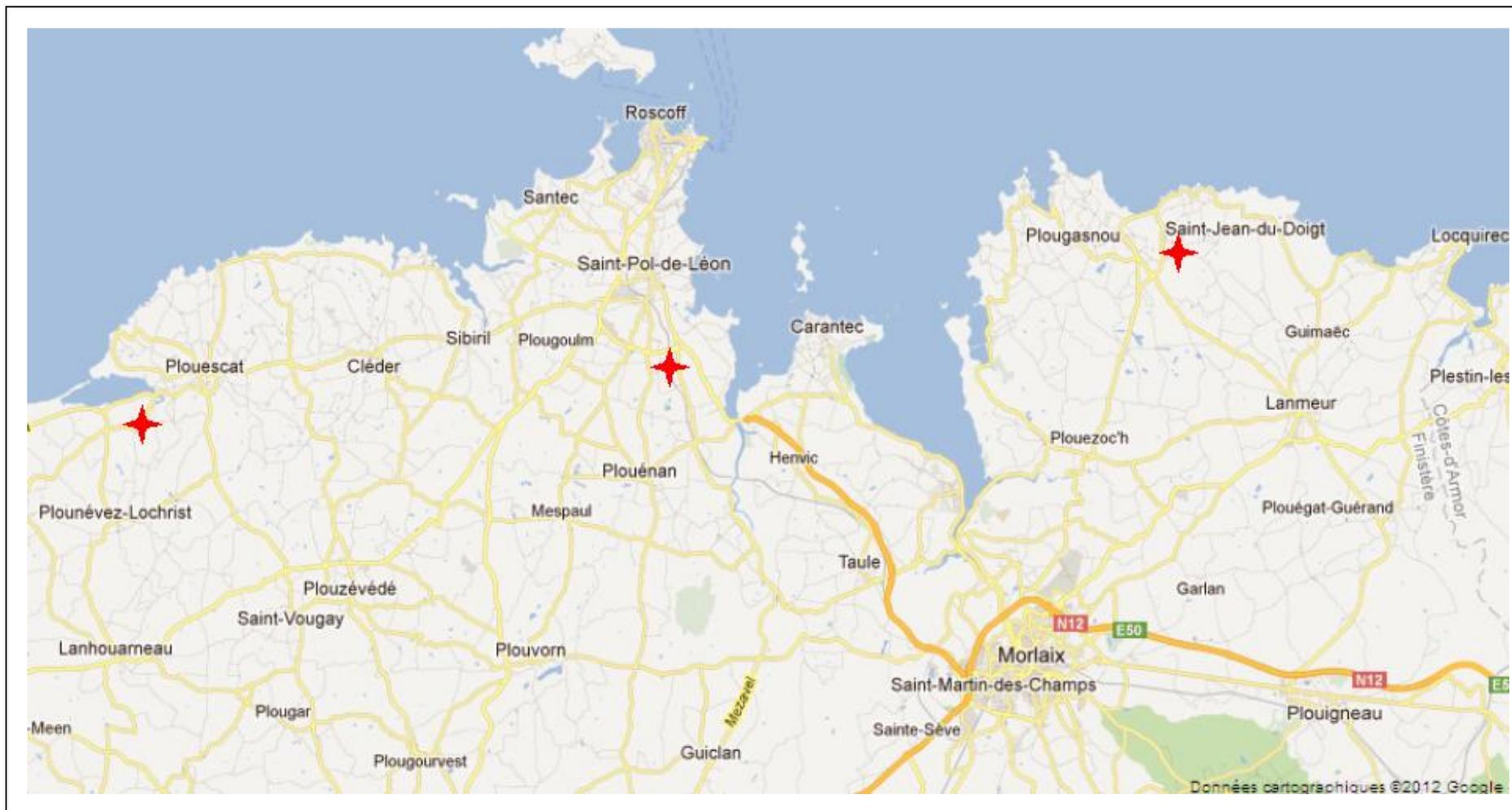
Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche, de la Ruralité et de l'Aménagement du territoire (page consultée le 05/04/12 et le 17/08/12). Site e-phy. <http://e-phy.agriculture.gouv.fr/>

## ANNEXE I : Agencement du programme MILART



(Source : Mezencev, 2012)

## ANNEXE II : Localisation des trois stations météorologiques du Finistère utilisées par MILART



(Source : Google Maps)

## ANNEXE III : Stades repères de l'artichaut



Stade "O"  
la tête non visible



Stade "A"  
la mère est encore  
cachée dans le  
feuillage  
la tête est formée



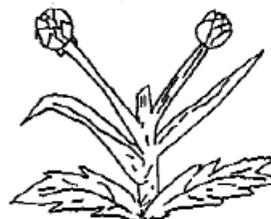
Stade "B"  
la mère sort du feuillage  
les ailerons sont encore  
cachés dans le feuillage



Stade "C"  
les ailerons sont  
apparents



Stade "D"  
les ailerons commencent  
à dépasser la mère



Stade "M"  
la mère, est récoltée



Stade "E"  
le 1<sup>er</sup> aileron est  
récolté



Stade "F"  
plant fini de récolter

(Source : Pérennec, 2012)

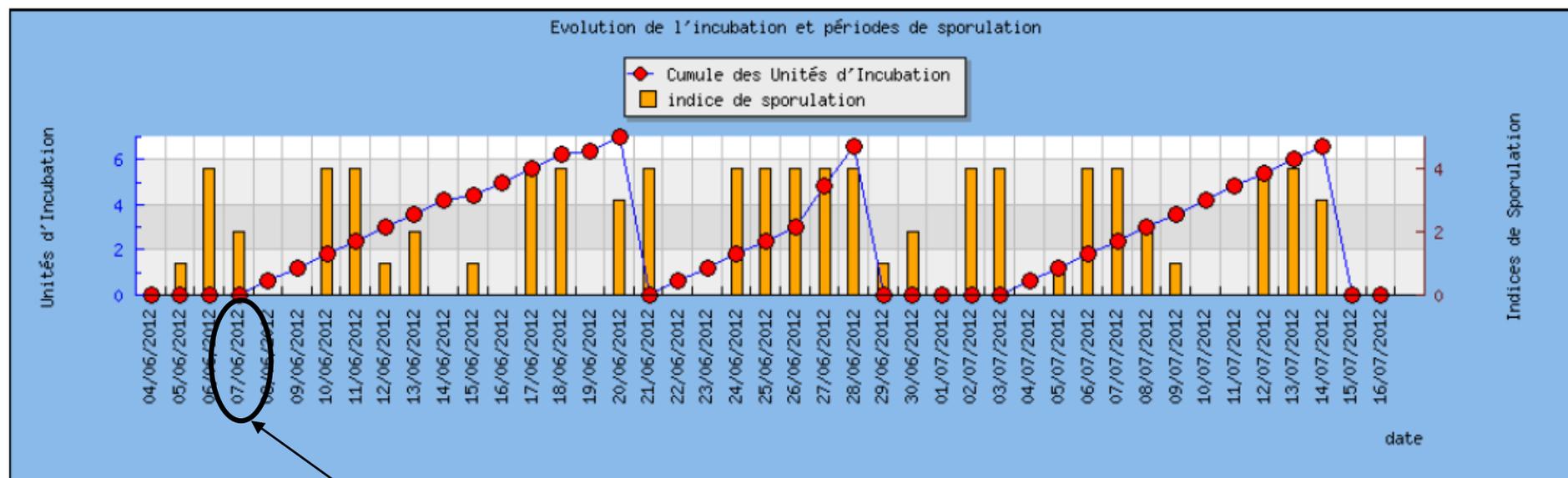
## ANNEXE IV : Exemple de sortie graphique donnée par MILART

Date de plantation : 03/06/2012  
Date de broyage :

Station météo de référence : CATE-St-Pol

alerte mildiou depuis le 14/07/2012

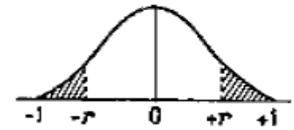
Variable ALERTE



Variable SP

## ANNEXE V : Table de corrélation

La table indique la probabilité  $\alpha$  pour que le coefficient de corrélation égale ou dépasse, en valeur absolue, une valeur donnée  $r$ , c'est-à-dire la probabilité extérieure à l'intervalle  $(-r, +r)$ , en fonction du nombre de degrés de liberté (d.d.l.)



d.d.l. \ $\alpha$	0,10	0,05	0,02	0,01
1	0,9877	0,9969	0,9995	0,9999
2	0,9000	0,9500	0,9800	0,9900
3	0,8054	0,8783	0,9343	0,9587
4	0,7293	0,8114	0,8822	0,9172
5	0,6694	0,7545	0,8329	0,8745
6	0,6215	0,7067	0,7887	0,8343
7	0,5822	0,6664	0,7498	0,7977
8	0,5494	0,6319	0,7155	0,7646
9	0,5214	0,6021	0,6851	0,7348
10	0,4973	0,5760	0,6581	0,7079
11	0,4762	0,5529	0,6339	0,6835
12	0,4575	0,5324	0,6120	0,6614
13	0,4409	0,5139	0,5923	0,6411
14	0,4259	0,4973	0,5742	0,6226
15	0,4124	0,4821	0,5577	0,6055
16	0,4000	0,4683	0,5425	0,5897
17	0,3887	0,4555	0,5285	0,5751
18	0,3783	0,4438	0,5155	0,5614
19	0,3687	0,4329	0,5034	0,5487
20	0,3598	0,4227	0,4921	0,5368
25	0,3233	0,3809	0,4451	0,4869
30	0,2960	0,3494	0,4093	0,4487
35	0,2746	0,3246	0,3810	0,4182
40	0,2573	0,3044	0,3578	0,3932
45	0,2428	0,2875	0,3384	0,3721
50	0,2306	0,2732	0,3218	0,3541
60	0,2108	0,2500	0,2948	0,3248
70	0,1954	0,2319	0,2737	0,3017
80	0,1829	0,2172	0,2565	0,2830
90	0,1726	0,2050	0,2422	0,2673
100	0,1638	0,1946	0,2301	0,2540

Exemple : avec d.d.l. = 30, pour  $r = 0,3494$  la probabilité est  $\alpha = 0,05$

(\*) D'après Fisher et Yates, Statistical tables for biological, agricultural and medical research (Oliver and Boyd, Edinburgh), avec l'aimable autorisation des auteurs et des éditeurs.

## ANNEXE VI : Exemple des données utilisées pour l'analyse statistique (modalité D1)

Code	D	Individus	$\Delta$ OBS	$\Delta$ SP	$\Delta$ ALERTE
2011JPC	1	1	206	115	208
2011BF	1	2	206	120	204
2011TR	1	3	178	121	209
2011ALC	1	4	192	121	209
2011JLG	1	5	220	115	208
2011YK	1	6	220	120	204
2011EPL	1	7	192	115	212
2010AK	1	8	214	128	211
2010ALC	1	9	186	129	208
2010AJ	1	10	200	128	190
2010EPR	1	11	214	128	189
2010GLF	1	12	200	128	189
2010GLS1	1	13	200	128	189
2010GLS2	1	14	200	128	211
2010JMP	1	15	214	128	189
2009EC	1	16	216	110	209
2009GLD	1	17	216	110	207
2009JJF	1	18	201	110	207
2009JYM	1	19	227	123	188
2009LJ	1	20	187	115	207
2009MLR	1	21	201	110	207
2009N	1	22	227	123	188
2009PM	1	23	201	115	207
2009RH	1	24	201	115	207
2009SQ	1	25	187	115	207
2010RC	1	26	256	128	190
2009CB	1	27	166	115	207
2008JMH	1	28	167	111	212

Code : nom de la parcelle (année + initiale du producteur)

D : paramètre de durée de survie des spores

$\Delta$ OBS : nombre de jours avant l'apparition des premiers symptômes dans les parcelles observées

$\Delta$ SP : nombre de jours avant la première sporulation calculée par le modèle MILART

$\Delta$ ALERTE : nombre de jours avant l'alerte émise par le modèle MILART

Les données extrêmes ont été au préalable retirées du jeu de données.

Dans cet exemple, la régression linéaire simple a été effectuée entre  $\Delta$ OBS et  $\Delta$ ALERTE (le résultat sorti par le logiciel R est présenté dans l'annexe suivante). Une deuxième régression a été faite entre  $\Delta$ SP et  $\Delta$ ALERTE.

# ANNEXE VII : Exemple d'une sortie de résultats du logiciel R pour la régression linéaire simple entre ΔOBS et ΔALERTE de la modalité D1

```
lm(ALERTE ~ OBS, data = Corrd1)

PARAMETRES
  Constante | Pente
  251.303   | -0.239

TABLE D'ANALYSE DE LA VARIANCE
  Somme des carrés | Degré de liberté | Moyenne des carrés | Statistique F | p-valeur
Modèle             | 1                 | 552.501              | 8.877          | 0.00619
Résidus            | 26                | 62.238               |                |

QUALITE DU MODELE
  R²      | R² ajusté | Erreur standard
  25.45 % | 22.59 %   | 7.889

PARAMETRES : intervalle de confiance et test (niveau 95 %)
  Estimation | Erreur standard | Intervalle de confiance | Statistique T |
  Constante  | 251.303         | 16.412                 | 217.568       | 285.038       | 15.312
  Pente      | -0.239         | 0.0804                 | -0.405       | -0.0742      | -2.979
  p-valeur   |                 |                         |               |               |

Constante 1.59e-14
Pente     0.00619

VALEURS ATYPIQUES ET POINTS D'INFLUENCE
  Pas de résidus suspects

-----

Observations influentes :
  Numéro observation | OBS | ALERTE | ALERTE estimé | Leverage | Distance de Cook
16                  | 256 | 190    | 190.012       | 0.323    | 8.17e-07
17                  | 166 | 207    | 211.56        | 0.181    | 0.045
28                  | 167 | 212    | 211.32        | 0.173    | 0.00094

RESIDUS DU MODELE
Autocorrélation entre les résidus : test de Durbin-watson
  Durbin-watson | Statistique | p-valeur
  1.367         | 1.367      | 0.0863

-----

Normalité des résidus : tests de kolmogorov-smirnov et de shapiro-wilk
Avis dans ks.test(residus, pnorm, mean(residus), sd(residus)) :
  ties should not be present for the Kolmogorov-Smirnov test
  Kolmogorov.Smirnov | Statistique | p-valeur
  0.214              | 0.214      | 0.155
  Shapiro.Wilk       | 0.898      | 0.0101

COMPARAISON ENTRE DIFFERENTS MODELES
  Modèle | erreur std | R² | R² ajusté
Linéaire : Y = aX + b | 7.8891 | 25.45 % | 22.59 %
Y = (aX + b)² | 0.2798 | 25.4 % | 22.53 %
Exponentiel : Y = exp(aX + b) | 0.0397 | 25.35 % | 22.48 %
1/Y = aX + b | 2e-04 | 25.25 % | 22.37 %
Y = a*sqrt(X) + b | 7.9028 | 25.19 % | 22.32 %
Logarithmique : Y = a log(X) + b | 7.9201 | 24.87 % | 21.98 %
Multiplicatif : Y = aX^b | 0.03986 | 24.75 % | 21.86 %
Y = a/X + b | 7.9644 | 24.02 % | 21.1 %
S-curve : Y = exp(a/X + b) | 0.04009 | 23.9 % | 20.98 %
1/Y = a/X + b | 0.000202 | 23.79 % | 20.86 %
>
```

	Diplôme : Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences Agronomiques, Agroalimentaires, Horticoles et du Paysage Spécialité : Horticulture Spécialisation / option : Fruits, Légumes, Alimentation et Marchés Enseignant référent : Gerhard Buck-Sorlin
Auteur(s) : Marie Cochenne Date de naissance : 31/05/1988	Organisme d'accueil : Chambre d'Agriculture du Finistère à St Pol de Léon Adresse : Kergompez 29250 SAINT POL DE LEON
Nb pages : 37                      Annexe(s) : 7	Maître de stage : Nicolas Mezencev
Année de soutenance : 2012	
Titre français : Le mildiou de l'artichaut, modèle épidémiologique et moyens de lutte Titre anglais : Artichoke downy mildew, epidemiology disease modelling and means of control	
<p>Résumé :</p> <p>Le premier problème fongique de l'artichaut en Bretagne est le mildiou du feuillage et des capitules causé par un oomycète <i>Bremia lactucae</i> Regel. Les spécialités phytosanitaires homologuées pour cet usage sont très peu nombreuses. Dans ce contexte, depuis quelques années, des réflexions sont menées sur un modèle de prévisions des risques de mildiou (MILART) et sur des produits alternatifs. La problématique de ce travail était de savoir si la protection phytosanitaire contre le mildiou de l'artichaut peut être améliorée via le modèle MILART et l'utilisation de produits alternatifs. Les objectifs ont été d'ajuster et valider le modèle MILART, et de tester des stimulateurs de défense des plantes (SDP) en laboratoire et au champ.</p> <p>Plusieurs simulations réalisées avec divers paramétrages ont été comparées avec l'évolution du mildiou dans le réseau de parcelles suivies de 2008 à 2011. Des régressions linéaires simples et des ANOVA ont permis d'ajuster le modèle. Puis, avec les paramètres ajustés, des simulations ont été effectuées avec les données 2012 dans le but de valider MILART. Un essai a aussi été mis en place pour comparer une stratégie de conduite par le modèle avec une stratégie conventionnelle de protection contre le mildiou. Le modèle MILART a ainsi pu être validé pour l'émission des dates. En revanche, le calcul de première sporulation n'a pas pu être validé et doit encore être ajusté, notamment en améliorant les connaissances fondamentales sur la conservation de <i>Bremia lactucae</i> en hiver.</p> <p>En parallèle, plusieurs SDP ont été testés en laboratoire et au champ. Trois SDP, le P11T14 à 2,5%, le P12JD04 à 3% et le P10A04 à 2,5%, se sont montrés intéressants au laboratoire. Ils ont été testés dans les conditions réelles de plein champ. Les premiers résultats ont révélé l'efficacité du P11T14 contre le mildiou de l'artichaut.</p>	
<p>Abstract :</p> <p>The main artichoke fungus problem in Brittany is downy mildew on leaves and flowers provoked by an oomycete <i>Bremia lactucae</i> Regel. Chemical control products are really scarce. Consequently over the last few years, downy mildew on artichoke modelling (MILART) and alternative products for controlling pathogens have been considered. The problem of this work was to know if protection against downy mildew can be improved by MILART and the use of alternative control products with the aim of adjusting and validating MILART, and to test resistance inducers in laboratory and field.</p> <p>Many simulations conducted with different parameters were compared to downy mildew growth within the network of fields followed from 2008 to 2011. Linear regressions and ANOVA have led to adjusting MILART. Then, with correct parameters, simulations with the data 2012 are conducted to validate MILART. A trial was carried out to compare model strategy with the classic downy mildew control strategy. The model MILART was validated for 'Alerte' dates. But calculation of first sporulation could not be validated, and had to be adjusted again notably with the improvement of data on <i>Bremia lactucae</i> conservation in winter.</p> <p>At the same time, many resistance inducers were tested in laboratory and fields. Three resistance inducers, P11T14 at 2,5%, P12JD04 at 3% and P10A04 at 2,5%, showed interesting results in laboratory. They were all tested in real field conditions. The first results revealed that P11T14 is the most effective against the downy mildew of artichoke.</p>	
Mots-clés : <i>Bremia lactucae</i> , artichaut, modèle de prévisions des risques, MILART, stimulateur de défense des plantes, Bretagne Key words : <i>Bremia lactucae</i> , artichoke, modelling plant disease, MILART, resistance inducers, Brittany	