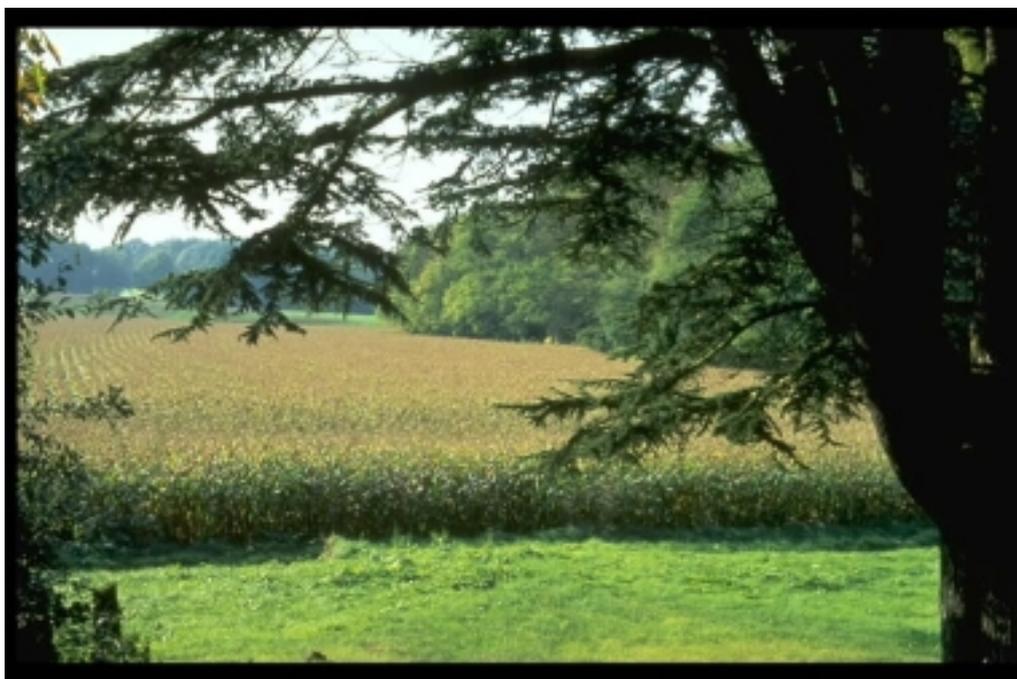


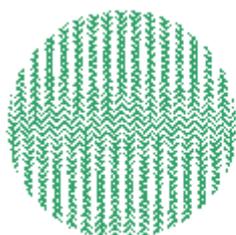
PROGRAMME DE RECHERCHE

Pertinence économique et faisabilité d'une filière
« sans utilisation d'OGM »



Isolement des collectes et maîtrise
des disséminations au champ

Jean-Marc MEYNARD ET Marianne LE BAIL



INRA

Institut National de la Recherche Agronomique



Projet Pertinence et faisabilité d'une filière "non OGM" en maïs et soja

Rapport du programme 3

<p>Isolement des collectes et maîtrise des disséminations au champ</p>

SOMMAIRE

INTRODUCTION	3
PREMIERE PARTIE : PROPOSITION DE STRATEGIES DE SEGREGATION AU CHAMP ET EN ENTREPRISE DE COLLECTE-STOCKAGE	5
I Maîtrise des contaminations au champ	5
II Maîtrise de l'isolement des collectes	11
1 La démarche d'étude	11
2 Les résultats	11
III Evaluation des risques de contamination à l'aide du modèle de simulation	20
DEUXIEME PARTIE : MODELISATION DES EFFETS DES SYSTEMES DE CULTURE ET DU CLIMAT SUR LES POLLINISATIONS CROISEES CHEZ LE MAÏS	21
I. La fonction de dispersion du pollen et ses paramètres	22
1. La fonction de dispersion (appelée NIG)	22
2. Direction et intensité du vent	23
3 Différence de hauteur entre épi récepteur non OGM et panicule émetteur de pollen OGM (h)	23
4. Le paramètre m	25
5. Objectif des adaptations du modèle existant	25
II. Dates de début de floraison	27
1. Floraison femelle	27
2. Floraison mâle	27
III. Production et viabilité du pollen	30
1. Dynamique journalière de floraison mâle	30
2. Quantités de pollen produites par variété	32
3. Effet des facteurs climatiques sur le pollen	33
IV. Réceptivité des soies	34
1. Dynamique de floraison femelle	34
2. Effet du climat sur la croissance et la réceptivité des soies	35
TROISIEME PARTIE : DIVERSITE DES SYSTEMES D'ISOLEMENT DES LOTS DE CEREALES EN ENTREPRISES DE COLLECTE-STOCKAGE	37
I Schéma conceptuel	37
II Matériel et méthodes	39
III Résultats	43
1- Diversité des systèmes de production de lots dans les ECS	43
2- Des risques de contamination a priori différents selon l'infrastructure de collecte –stockage et des variables de pilotage mises en œuvre pour maîtriser ces risques.	49
CONCLUSION GENERALE DU PROGRAMME 3	52
REMERCIEMENTS	53
BIBLIOGRAPHIE	54

Rapport du programme 3

Isolement des collectes et maîtrise des disséminations au champ

Introduction

Ce rapport traite des risques de contamination des récoltes de maïs et de soja au champ, et lors de la phase de collecte et de stockage des grains qui suit immédiatement les moissons. Au champ, la dissémination d'un caractère transgénique d'une parcelle à une autre peut se faire par des graines ou du pollen (Colbach *et al.*, 2000), aboutissant à des contaminations fortuites dont le niveau dépendra de la distance entre champs contaminé et contaminant, mais aussi de leurs systèmes de culture. Les contaminations lors de la collecte et du stockage dépendent i) de l'organisation de la production ii) des transactions et des flux de graines dans l'exploitation agricole, iii) entre celle-ci et l'entreprise de première mise en marché, et iv) au sein de cette dernière.

Dans une première partie, nous présentons les principales conclusions de l'étude menée selon ces deux axes. Les deux parties suivantes, destinées aux lecteurs désireux d'approfondir leur connaissance des méthodologies de recherche, présenteront respectivement :

- un modèle de flux de gènes entre parcelles de maïs, élaboré dans le cadre de l'étude,
- le travail d'enquête mené auprès d'entreprises de collecte-stockage qui a permis d'identifier les stratégies de ségrégation de lots de produits récoltés actuellement mises en œuvre en soja et maïs.

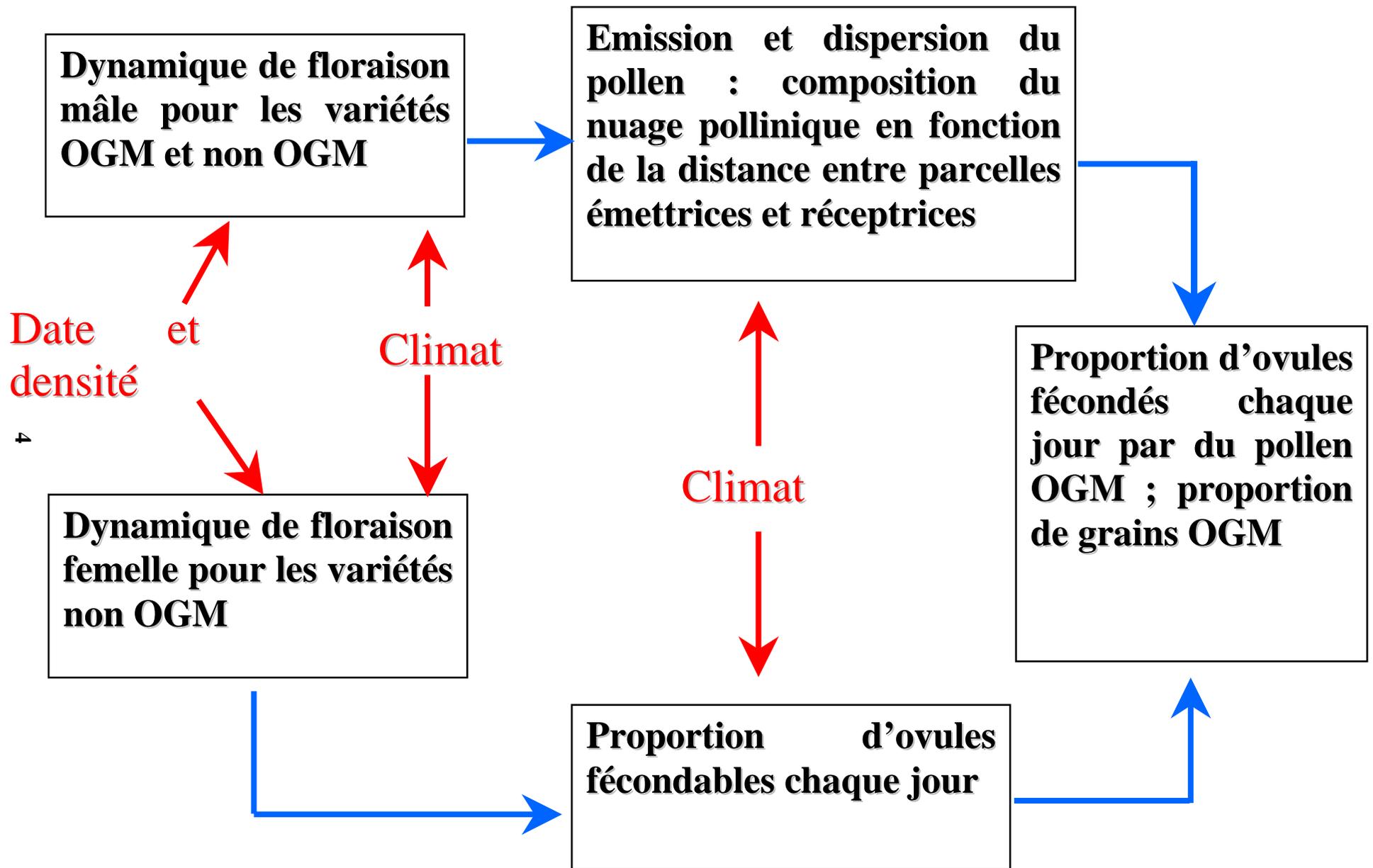


Figure I1 : Organigramme simplifié du modèle

PREMIERE PARTIE

Proposition de stratégies de ségrégation au champ et en entreprise de collecte-stockage

Synthèse rédigée par M. Le Bail*, J.M. Meynard** et F. Angevin**

* INA-PG, **INRA

I Maîtrise des contaminations au champ

Les contaminations au champ peuvent avoir lieu par le biais de repousses (issues de graines tombées au sol lors d'une culture précédente), de fécondation par du pollen allogène, ou une contamination des semences, ayant lieu lors de la production ou du conditionnement de celles-ci.

Dans le cas du soja, la question est relativement simple : on n'observe que très peu de repousses après récolte et celles-ci sont détruites par les froids hivernaux. Le soja étant une plante autogame à plus de 99 % ¹ (résultats INRA Montpellier, Roumet (com. pers.) ; Chiang & Kiang, 1987). Si les semences ne sont pas contaminées, il n'y a donc aucun risque de dépasser le seuil de 1%. Cependant, les facteurs qui influent sur l'allogamie du soja et, *a fortiori*, les moyens de maîtrise de cette allogamie n'apparaissent pas avoir été étudiés jusqu'à présent. Il semblerait que certaines variétés soient plus sujettes à l'allogamie que d'autres.

Le principal vecteur de pollen extérieur reste les insectes (abeilles, mouches). On ne peut exclure que dans certaines conditions particulières (variétés où la fécondation se produit après l'ouverture des fleurs, population d'insectes importante au voisinage des champs de soja, proximité de champs de soja OGM), les seuils de 0,1 % et surtout de 0,01 % soient dépassés. Pour garantir le respect de ces seuils, un choix de la variété et des conditions d'isolement sont sans doute nécessaires, mais les données qui permettraient de mettre en place ces procédures n'existent pas.

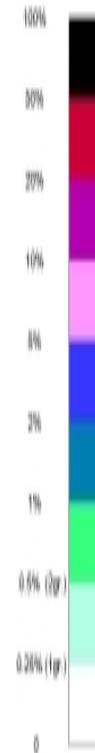
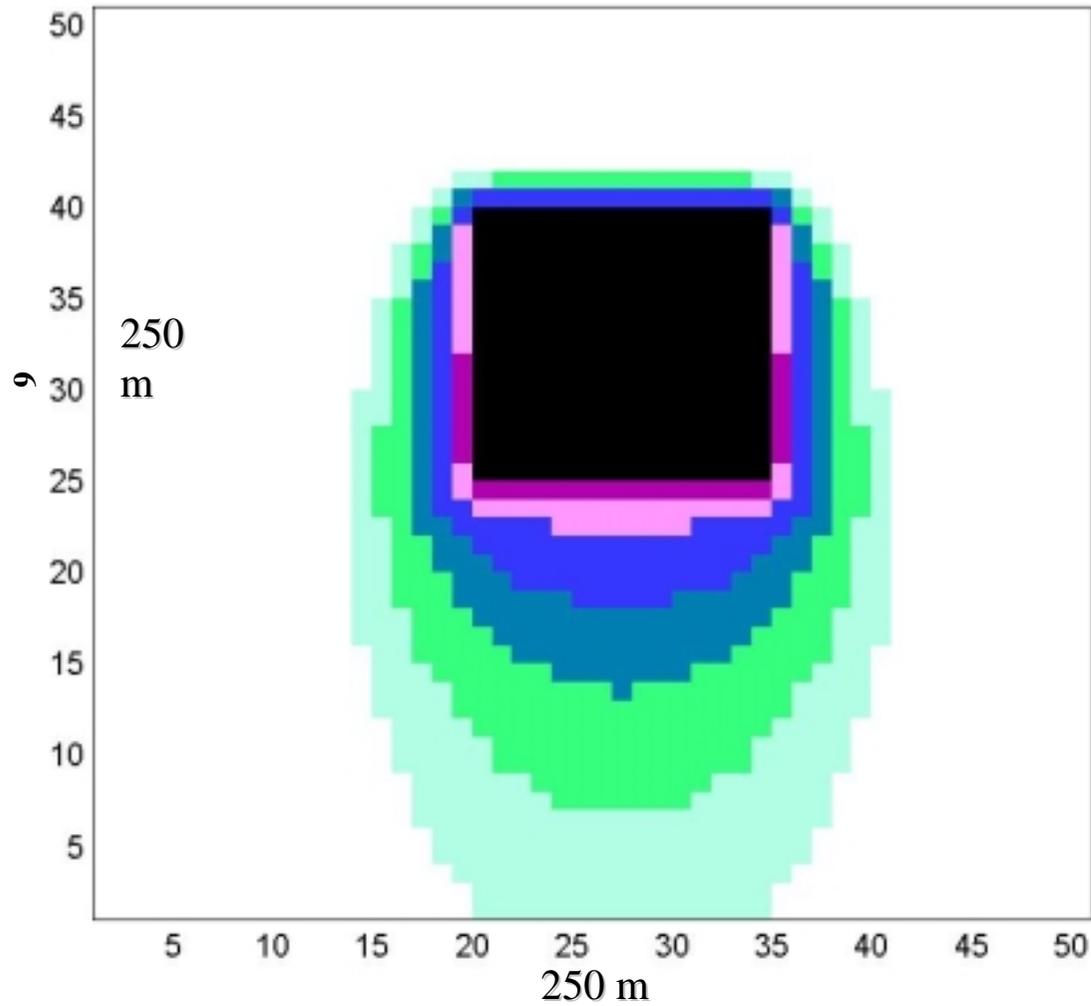
Pour le soja, le risque majeur de contamination des champs provient donc des semences qui peuvent faire l'objet de mélanges lors des processus de tri/traitement. Un contrôle serré des semences importées et une séparation des flux de conditionnement des semences OGM (voir infra) et non-OGM sont donc des conditions suffisantes pour la garantie du respect des différents seuils, à l'exception du seuil de détection.

Le problème à résoudre est beaucoup plus complexe **pour le maïs**. Les repousses ne posent guère plus de problèmes qu'en soja²; mais les inflorescences mâles et femelles étant totalement séparées sur la plante, la fécondation du maïs est essentiellement assurée par du pollen venant d'autres plantes : la composition du nuage pollinique, qui peut comprendre du pollen des parcelles voisines, va conditionner la "pureté" des récoltes. La production de semences est particulièrement vulnérable au pollen extérieur, puisque la quantité de pollen autochtone est réduite. En effet, seules les lignées mâles produisent du pollen, les lignées femelles ayant été castrées. De plus, les hybrides cultivés produisent plus de pollen que les lignées pures utilisées en production de semences.

¹ C'est-à-dire que plus de 99 % des fleurs sont fécondées par du pollen provenant de la même plante

² Le nombre maximum de repousses observées en cas de succession Maïs/Maïs serait de l'ordre de 100 plantes par hectare, ce qui suffirait à atteindre le seuil de 1 %. Ceci pourrait arriver en cas de maïs non-OGM succédant immédiatement à un maïs OGM. Cependant les repousses sont aisément repérables par leur position en entre-rang et pourraient être enlevées manuellement.

Figure I2 : Illustration des contaminations autour d'une parcelle de 1/2 hectare semée en maïs OGM



Situation simulée avec le modèle :

- ➔ Pas de discontinuité entre la parcelle OGM (en noir) et la parcelle de maïs non OGM qui l'entoure
- ➔ Même précocité de floraison pour les deux variétés
- ➔ Mêmes quantités de pollen produites
- ➔ OGM homozygote

Sens du vent

vitesse : 2 m/s pendant toute la floraison



La mise au point de stratégies d'isolement des parcelles non-OGM en vue d'éviter leur contamination par du pollen OGM repose dans notre étude sur la modélisation des flux de pollen et des fécondations croisées entre parcelles voisines. Ce modèle est présenté en détail dans la seconde partie.

La figure II présente l'organigramme simplifié du modèle. Un premier module détermine les dates de floraison mâle et femelle en fonction du climat (somme de degrés-jours). Le stress hydrique et la densité de semis influent sur le décalage entre début de floraison mâle et femelle (protandrie). La floraison mâle dure environ une semaine (suivant le climat).

La dispersion du pollen est simulée par l'équation de Klein (2000). Elle est fonction de la distance à l'émetteur et a pour paramètres la direction et l'intensité moyenne du vent au cours de la floraison ainsi que la différence de hauteur entre panicule émetteur et soies réceptrices. La composition du nuage pollinique en un endroit donné d'un champ non-OGM résulte des courbes de dispersion du pollen de toutes les plantes du voisinage, proches ou lointaines.

Les facteurs influençant la dynamique de floraison femelle sont la température et le stress hydrique au cours de celle-ci.

Chaque jour, la composition du nuage pollinique définit le pourcentage de grains ayant différents génotypes : le taux de grains OGM est calculé en fonction du nombre d'ovules non-OGM fécondés par du pollen OGM rapporté au nombre total d'ovules fécondés.

Ces résultats journaliers sont agrégés pour fournir un taux global de grains OGM dans la récolte.

Les variables d'entrée du modèle sont les suivantes :

- La forme et la taille des parcelles incluant la répartition des variétés OGM et non-OGM ;
- le climat (vent, température, précipitations) ;
- les dates et densités de semis ;
- le stress hydrique avant et pendant floraison ;
- et plusieurs paramètres variétaux (quantités de pollen produites, sensibilité du pollen à la température, précocité de floraison, homo- ou hétérozygotie pour le caractère transgénique)

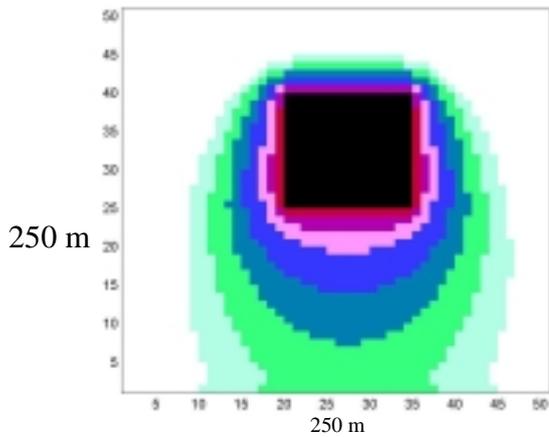
Ce modèle est encore en cours de validation et les résultats ci-après seront à affiner dans les mois qui viennent. En l'état actuel d'avancement de la modélisation, les discontinuités (sol nu, autres cultures) sont simulées par des plantes totalement stériles (voir chapitre suivant).

Une illustration des taux de contamination d'une parcelle non-OGM de 6 ha environ par une parcelle OGM d'un demi-hectare située en son sein est donnée sur la figure I2. Dans cette simulation, un vent de 2 mètres par seconde souffle pendant toute la période de floraison. Les deux variétés, de même précocité, ont été semées à la même date et produisent les mêmes quantités de pollen ; la variété OGM est homozygote. On visualise sur cette illustration l'importance de l'effet de la distance à la source et du vent qui crée une dissymétrie dans la géographie des contaminations.

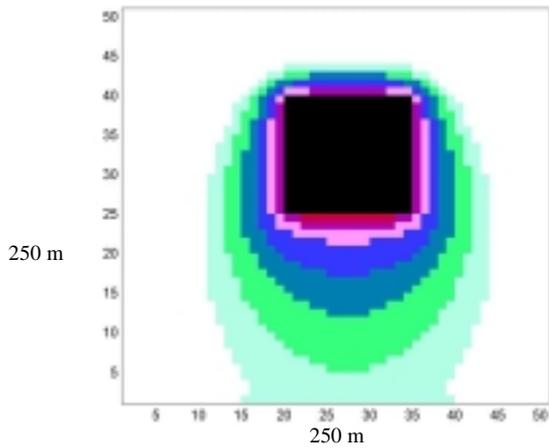
De nombreuses simulations ont été réalisées, faisant varier la taille des parcelles, leur distance, la largeur "détournée" ³, la vitesse du vent et les caractéristiques des variétés cultivées. Pour chaque simulation, la variable de sortie considérée est le pourcentage de grains récoltés porteurs du transgène (homozygotes ou hétérozygotes).

³ Le détournement d'une parcelle consiste à récolter séparément le tour de la parcelle et sa partie centrale. Une récolte séparée de la partie de la parcelle non-OGM la plus proche de la parcelle OGM voisine est susceptible de réduire le taux moyen de contamination.

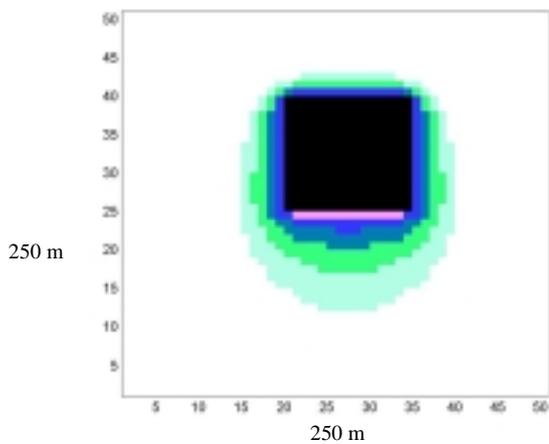
Même précocité de floraison



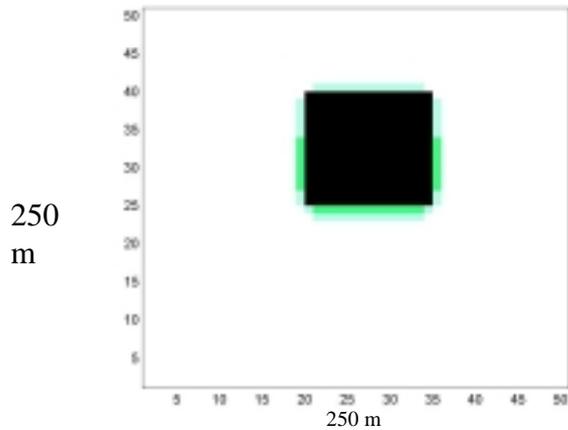
La variété non OGM fleurit 2 jours (25°) après la variété OGM



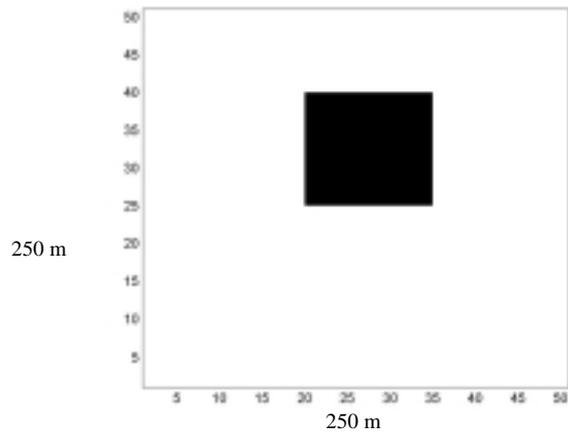
La variété non OGM fleurit 4 jours (50°) après la variété OGM



La variété non OGM fleurit 6 jours (75°) après la variété OGM



La variété non OGM fleurit 8 jours (100°) après la variété OGM



Situation simulée avec le modèle :

- Pas de discontinuité entre la parcelle OGM (en noir) et la parcelle de maïs non OGM qui l'entoure
- Mêmes quantités de pollen produites
- OGM homozygote

Figure I3 : Influence du décalage de précocité de floraison sur la contamination par pollinisation croisée

Même code de couleurs que la figure I2

Sens du vent ↓

Vitesse : 4 m/s pendant toute la floraison

La figure I3 présente, à titre d'illustration, l'influence du décalage de précocité de floraison entre le champ non-OGM et un champ OGM (même dispositif que pour la figure I2 : 0,56 ha dans 6,25 ha) sur les taux de contamination.

On observe qu'en raison de la protandrie du maïs⁴, il est beaucoup plus efficace pour limiter les disséminations d'OGM que la variété OGM fleurisse avant la variété non-OGM.

Les simulations ont été réalisées en considérant deux parcelles de même taille. Les recommandations qui suivent ont été établies en s'appuyant sur le cas d'une parcelle non-OGM placée sous le vent d'une parcelle OGM (vent de 4 mètres par seconde pendant toute la floraison). Ainsi, pour un seuil donné, les consignes données garantissent le respect du seuil dans une grande majorité de cas. Cependant, l'état actuel des connaissances ne permet pas d'estimer de manière fiable la probabilité de dépasser ce seuil, en intégrant l'incertitude climatique, l'incertitude liée à l'estimation des paramètres du modèle et la diversité des situations paysagères et agronomiques.

Il apparaît, dans ces simulations, qu'il est relativement aisé de respecter un **seuil maximal de contamination de 5 %** : c'est possible en parcelles adjacentes et sans décalage de floraison, à condition soit que la parcelle non-OGM soit au moins deux fois plus grande que la parcelle non-OGM voisine, soit que les 15 mètres de la parcelle non-OGM les plus proches de la parcelle OGM soient récoltés à part.

Ne pas dépasser le seuil de 1 % suppose déjà que des précautions spécifiques soient prises : pour des parcelles de maïs consommation de même taille, une distance de 100 mètres (bordure à bordure) doit séparer un champ non-OGM des parcelles OGM les plus proches. Pour que ce même seuil soit respecté sur des parcelles contiguës, la floraison doit être décalée de 50°j (soit environ 4 jours pour les températures moyennes de juillet dans le Bassin Parisien), la variété OGM étant plus précoce.

Le seuil de 0.1 % ne peut être respecté sur des parcelles contiguës que si la floraison est décalée de 75° j, la variété OGM étant toujours la plus précoce. Si la floraison des deux parcelles est concomitante, la distance minimale entre les bords des deux parcelles doit être d'au moins 400 mètres. Cette dernière solution est très contraignante en région de production de maïs, mais sans doute plus aisée à mettre en œuvre que le décalage de floraison : en effet, dans une région donnée, la majorité des agriculteurs sème à des dates voisines des variétés de précocité similaire. La date de semis choisie, qui varie d'une année à l'autre, est fonction des conditions climatiques du printemps ; le groupe de précocité variétale choisi permet, pour les dates de semis les plus fréquentes, de récolter le maïs à l'automne avant que la réhumectation du sol ne rende trop difficile la circulation des engins. Ainsi, dans le Sud-Ouest, où les variétés tardives dominent, il sera impossible, si ces variétés sont OGM, de prémunir des champs non-OGM en choisissant des variétés fleurissant 75°j plus tard car celles-ci n'existent pas. Dans le Bassin Parisien, où les variétés précoces dominent, il est envisageable de semer des variétés non-OGM tardives, mais la récolte de ces dernières sera aléatoire car elles arriveront à maturité très tard à l'automne⁵.

⁴ La floraison mâle commence généralement avant la floraison femelle) ; pour plus de détails, voir Partie 2

⁵ En tout état de cause, ces récoltes tardives devraient être séchées, ce qui accroîtra les coûts de production

Le seuil de 0.01 % (traces) poserait encore plus de problèmes : en parcelles contiguës, un décalage de floraison de 100° j est nécessaire, ce qui n'est possible qu'avec des variétés qui ne cohabitent pas habituellement dans les champs. Si, pour rester réaliste, on retient un décalage de floraison de 75°.j, une distance d'isolement de 200 mètres est nécessaire.

Toutes ces données concernent le maïs consommation ; étant donné la faible quantité de pollen émis par un champ de production de semences, le voisinage entre celui-ci et un maïs de consommation OGM pourrait imposer des contraintes plus drastiques. Nous avons comparé les modalités d'isolement nécessaires pour respecter les différents seuils en production de semences et en production de maïs consommation. Pour le seuil de 1 %, la distance d'isolement pour les productions de semences, à même précocité, passe de 100 à 400 mètres ; pour le seuil de 0.1 %, un décalage de floraison de 75°.j doit s'ajouter à la distance d'isolement de 400 mètres déjà recommandée en maïs consommation. Si des variétés OGM étaient cultivées en France sur des surfaces importantes, il deviendrait ainsi quasiment impossible de garantir le respect d'un seuil de présence d'OGM de 0.1 % pour les semences de variétés tardives et très difficile pour les variétés précoces.

II Maîtrise de l'isolement des collectes

Il s'agit ici d'éclairer la question de l'analyse des risques et des procédures de maîtrise de la contamination de lots "non OGM" en maïs et soja entre la sortie du champ et la sortie des entreprises de collecte stockage.

1 La démarche d'étude (détaillée dans la troisième partie)

Afin d'appréhender les différentes modalités de flux et les fonctions intervenant dans l'isolement, des enquêtes ont été réalisées auprès de 23 entreprises de collecte et de stockage. Le processus de recueil de données et de validation des résultats a été, par ailleurs, appuyé par un groupe de travail interactif composé d'une vingtaine de membres d'organisations professionnelles agro-alimentaires associées dans le projet de recherche global (associations de consommateurs, entreprises de collecte, de transformation, semenciers, représentants des industries des phytosanitaires et des engrais, instituts techniques et groupements interprofessionnels, services du ministère de l'agriculture, ...).

Les entreprises enquêtées ont été choisies en faisant varier deux paramètres accessibles dans les statistiques disponibles et dans les références des instituts techniques impliqués (AGPM, CETIOM) dans le projet, et susceptibles d'influer sur les stratégies d'isolement : le volume total de grains collectés et la part du maïs et/ou du soja dans la collecte (Tableau III1 dans la partie 3). Les entreprises enquêtées représentent environ 28% de la collecte française de maïs (58% de la collecte de maïs en Aquitaine et Midi-Pyrénées, 43% de la collecte en Alsace les trois régions principales de l'étude) et 42% de la collecte de soja.

Les enquêtes ont porté sur les modalités d'isolement existantes entre différents types de maïs ou de soja dans les entreprises rencontrées (maïs et soja standard ; maïs amidonnier ou destiné à la brasserie ; maïs waxy, riche en huile, destiné au gavage, soja pour l'alimentation humaine...). Puis, à partir des spécificités des OGM on a dégagé différentes logiques d'isolement envisageables en soulignant leurs limites. Enfin, à l'aide du modèle de dispersion entre parcelles (Seconde partie) on a testé l'intérêt de ces logiques d'isolement au regard de différents seuils de pureté attendus.

2 Les résultats

Le système étudié se situe entre la sortie des parcelles et la sortie de l'ECS⁶ qui est elle même schématiquement composée de centres de réception et de centres de regroupement de séchage et de stockage.

2-1 Des risques de contamination a priori différents selon l'infrastructure de collecte – stockage.

L'observation des modalités physiques de la collecte et du stockage (décrites en détail dans la troisième partie), permet d'identifier deux variables clés jouant sur la diversité des risques de contamination des lots.

⁶ Entreprises de Collecte-Stockage

La première est le nombre de transferts (Schéma I1) que subit le lot entre la sortie du champ et la vente (mêlé aux autres récoltes parcellaires) au client de l'ECS. A chaque transfert, les risques liés au transport (propreté des bennes, couverture pendant le transport...), au transilage (grains restants dans les élévateurs, les silos, les chaînes de manutention) et aux stockages intermédiaires se multiplient. Pour des filières de haute valeur ajoutée ces risques sont compensés par un redoublement de précaution en matière de nettoyage mais ce n'est pas le cas général. Pour cette variable nous avons distingué trois modalités : (i) l'apport direct dans le silo du client ; (ii) l'apport direct dans le site de regroupement-séchage où se fera le stockage final avant vente au client ; (iii) le passage par des points de collecte intermédiaires avant le site de séchage-stockage.

La seconde variable est le degré de spécialisation des équipements affectés à l'allotement (Schéma I2). Pour le maïs en particulier, le séchoir y constitue un point de convergence des flux et par là même un point sensible en matière de risque de contamination. Nous avons distingué trois niveaux de spécialisation : (i) un niveau de spécialisation forte où l'ensemble des modalités de transport, transilage, séchage et stockage sont dédiées à un seul produit, ce qui limite les risques de croisement de flux ; (ii) à l'inverse, le niveau le plus faible correspond à un site de regroupement où plusieurs produits convergent et sont traités avec les mêmes outils ; (iii) un niveau intermédiaire, dans lequel tout en convergeant vers le même site les flux peuvent être traités par deux chaînes plus ou moins isolées en fonction des aléas de l'année.

A l'intersection de ces deux variables nous avons pu classer les situations enquêtées dans six types d'infrastructures auxquelles sont attachées des risques différents, a priori croissants entre le type 6 et le type 1 (Tableau I2).

Tableau I2 Différents groupes d'infrastructures de stockage

Nombre de transferts entre l'agriculteur et l'industriel	Spécialisation des outils de collecte stockage / filières de débouchés		
	Système peu spécialisé	Système intermédiaire	Système dédié
3 transferts	GROUPE 1 5 Maïs standard 3 maïs amidon/brasserie	GROUPE 2 5 maïs waxy 3 soja spécifique 1 maïs gavage	GROUPE 3 2 maïs Waxy
2 transferts	(non rencontrés : petits négociants)	GROUPE 4 3 maïs standard (négociants) 2 soja standard 1 maïs waxy 2 soja spécifique 1 maïs semence 1 maïs riche en huile	GROUPE 5 1 Maïs waxy 1 Maïs gavage
1 transfert	GROUPE 6 1 maïs waxy 1 maïs gavage 1 maïs riche en huile		

Face à ces différents risques inhérents aux infrastructures, les entreprises de collecte stockage mettent en œuvre des procédures variées qui comprennent des outils agronomiques, des dispositifs de transaction avec les agriculteurs et des moyens de contrôle (détaillés dans la troisième partie).

2-2 Différentes logiques de maîtrise des risques pour l'isolement de lots « non OGM »

L'observation des différents types d'organisation des flux logistiques et des variables de pilotage des lots observées sur des filières existants dans les ECS permet de discuter, au regard des spécificités des cultures OGM⁷, de différentes logiques d'isolement applicables à une filière « non OGM ».

Nous en avons dégagé trois pour le maïs, production où les risques de contamination sont plus forts qu'en soja au niveau de la parcelle et au niveau du goulot d'étranglement que constitue le séchoir.

a Une logique d'isolement régional

Cette logique vise à éviter tout OGM dans le bassin d'approvisionnement des ECS. Par une coordination entre tous les acteurs de la région on s'interdit toute vente, implantation, collecte de semences d'OGM sur une bassin de production "naturellement" isolé.

C'est un modèle de ce type sur lequel s'appuie aujourd'hui l'Alsace "protégée" par le Rhin et les Vosges d'éventuelles contaminations par les régions voisines.

Le système s'appuie sur trois dispositifs.

Le premier dispositif concerne un contrôle étroit des semences. Dans une région sans parcelle de multiplication de semences, l'entente entre ECS et semenciers porte sur : un contrôle accru des semences (les ECS font des contrôles sur les semences déjà certifiées par sondage et analyse PCR), une réduction considérable des expérimentations sur OGM (et une communication des listes des essais) et un engagement des semenciers de ne pas vendre de semences OGM et de ne pas distribuer de doses gratuites de variétés OGM aux agriculteurs, pratique de promotion de leurs produits assez répandue jusqu'ici. Une politique de prix des semences compétitifs vis à vis des régions voisines (l'Allemagne par exemple) réduit en principe la tentation pour l'agriculteur d'aller y acheter ses semences.

Le second dispositif a pour objet d'évaluer précocement les risques de contamination des lots sur la région. Avant récolte, une campagne de prélèvements au champ est organisée. Par secteur de collecte, une analyse PCR est faite sur un échantillon composé à partir d'un prélèvement par sous-zone ("village" en Alsace) d'épis encore immatures. Dans les zones limitrophes des régions où la circulation des semences est moins contrôlée les analyses sont plus nombreuses et permettent d'écarter les silos à hauts risques de contamination des mélanges finaux. Par ailleurs, les agriculteurs s'engagent par déclaration signée à ne pas livrer de récolte OGM.

Le troisième dispositif consiste à analyser après séchoir le taux de contamination des lots destinés aux amidonniers sur des échantillons prélevés automatiquement pour faire

⁷ Le seuil de mélange fortuit est a priori plus faible que les seuils tolérés dans les filières étudiées ; la détection, longue et coûteuse, de la présence d'OGM dans les lots ne peut être réalisée sur chaque benne de livraison pour décider de son affectation

Tableau I3 Abaque d'évaluation des contaminations de lots constitués sans tri des parcelles OGM d'un bassin d'approvisionnement d'ECS

Superficie concernée par la contamination (en ha)	% de contamination	Contamination résultante dans la cellule de stockage de 4000 tonnes
0.04	100	0.01%
0.4	100	0.1%
4	1	0.01%
4	100	1%
40	0.1	0.01%
40	1	0.1%
400	0.01	0.01%
400	0.1	0.1%
400	1	1%

Tableau I4 Evaluation du coût des analyses pour un volume vendu de 4000 tonnes dans deux situations de stockage des récoltes : par l'ECS ou par des agriculteurs.

	Volume de stockage unitaire	Nombre d'analyse pour un lot de 4000 tonnes	Prix de l'analyse*	Coût total par tonne
A l'ECS	4000	1	1000	0.25 f / T
Chez les agriculteurs	400	10	700	1.75 f / T

*on suppose que la multiplication des analyses rend leur coût unitaire moindre

l'ensemble des analyses imposées par les contrats avec les clients. Le volume important des cellules (entre 1000 et 6000 tonnes) permet une certaine dilution d'éventuels lots pollués.

L'intérêt de cette procédure est d'organiser une coordination des différents acteurs de la filière maïs dans la région autour d'un message sans ambiguïté du "tout non OGM", auquel les amidonniers, qui veulent des lots à moins de 0.01%, sont assez sensibles. Il permet de garder les mêmes structures d'équipements plutôt adaptées à une production de masse qu'à une collecte très segmentée, en s'appuyant sur une politique de mélange de gros volumes. Il y a peu de coûts supplémentaires de transaction avec les agriculteurs (pas de contrat) hormis l'information sur la nécessité de s'isoler des régions voisines, peu de coûts d'équipements supplémentaires. Les surcoûts portent essentiellement sur le poste "analyses".

Les inconvénients de cette procédure portent essentiellement sur sa fragilité en cas d'expansion des OGM en France. En effet, il n'y a pas de traçabilité avant le séchoir. Il suffit qu'un champ de 4 ha de maïs OGM à 100% ne soit pas déclaré pour qu'un silo de 4000 tonnes soit contaminé à 1%. Il suffit de 40 ha contaminés à 1%, inclus dans le même silo de 4000 tonnes pour que celui-ci soit refusé par les amidonniers qui fixent le refus à la limite de détection des appareils (soit 0.01%) (Tableau I3). Les analyses systématiques en sortie de séchoir permettent de repérer un tel silo mais c'est d'un coup 4000 tonnes qui sont déclassées !

En définitive, ce système est fondé sur une grande vigilance sur l'origine des semences utilisées par les agriculteurs et une excellente qualité de celles-ci. Il impose donc une présence des ECS sur le terrain par l'entremise de leurs services techniques pour évaluer précocement les risques, entre autres, via un approfondissement des méthodes de contrôle statistiques a priori par secteur de collecte.

b Une logique d'isolement par des agriculteurs sécheurs-stockeurs

Les équipements de séchage et de stockage des agriculteurs qui en disposent sont mobilisés pour isoler des lots "non OGM" (ou des lots "OGM") en reportant dans le temps leur collecte par l'entreprise de collecte stockage.

Le système s'appuie sur deux dispositifs.

Le premier dispositif consiste à choisir des agriculteurs disposant de gros volumes de stockage et d'une technicité de séchage ne dégradant pas les autres qualité du maïs (l'évaluation des volumes mobilisables et de la qualité du séchage n'a pu être faite). L'ECS n'a plus la charge de séparer les lots puisque les lots stockés par les agriculteurs peuvent être appelés une fois les silos de l'ECS libérés ou être livrés directement au client final.

Le second dispositif consiste à réaliser des analyses PCR chez chaque agriculteur pour décider de l'inclure dans le regroupement final ou de l'exclure.

L'intérêt de cette démarche est une réduction des risques de contamination entre lots chez le collecteur puisque l'on décale dans le temps les flux de collecte OGM et "non OGM". Elle débouche sur une traçabilité de l'origine, voire une traçabilité parcellaire facilitée, puisque l'on n'a plus de mélange de livraisons de provenance diverses dans les infrastructures de l'ECS et que les analyses par exploitation désignent immédiatement une éventuelle source de contamination. En revanche cette logique d'isolement par des agriculteurs stockeurs a plusieurs inconvénients. Son coût peut être élevé si l'on considère non seulement le coût en matière d'analyse (Tableau I4) mais aussi le financement des capacités de stockage des

agriculteurs. En effet cette démarche reporte la responsabilité des contaminations sur les agriculteurs qui chercheront à se couvrir financièrement pour compenser ces risques. La gestion des contaminations par flux polliniques peut en effet poser problème en l'absence de coordination entre agriculteurs, Particulièrement lorsque les parcelles sont petites et les parcellaires d'exploitations éclatés. Enfin, si cette logique évite à l'ECS d'investir dans les infrastructures lui permettant d'isoler des lots de petite taille, elle présuppose cependant l'existence sur le bassin de collecte d'équipements de séchage et stockage à la ferme adaptés à la taille et à la nature de la filière. Il n'a pas été possible de les quantifier dans les régions étudiées.

c Une logique d'isolement par contrat

Des contrats avec les agriculteurs sont utilisés pour coordonner leurs pratiques sur un bassin et optimiser l'utilisation des infrastructures de l'entreprise de collecte – stockage.

A ce titre, nous avons distingué deux situations.

Si l'ECS a un site dédié à un type de maïs avec, en particulier, un séchoir qui lui est consacré, le contrat visera alors à réduire les risques au niveau des parcelles et du transfert vers ce silo :

- en proposant des distances d'isolement, des dates de floraison ménageant des décalages de floraison entre parcelles OGM et "non OGM",
- en créant un îlot de production autour du silo en octroyant les contrats aux agriculteurs qui l'entourent.

Ce dispositif est sans doute celui qui garantit le meilleur isolement et permet une traçabilité d'origine et de moyens (le système est complété par des fiches de description de l'itinéraire technique de l'agriculteur : numéro du lot de semences, pratique de détournage...). Cependant, c'est ici le volume de stockage du site dédié et les capacités de séchage qui lui sont associés qui limitent le volume du lot ainsi isolable.

Dans ce système, le contrat doit être l'occasion de gérer entre l'ECS et le groupe de producteurs contractants la répartition spatiale des cultures en vue d'éviter les contaminations entre parcelles voisines.

Si l'ECS n'a pas de silo dédié et souhaite malgré tout trier deux lots (OGM et "non OGM") on est dans la situation où les risques de contamination de lots sont les plus forts. Dans ce cas l'ECS doit optimiser l'utilisation de son séchoir :

- en fixant dans le contrat, une date de livraison pour un type de maïs donné pour regrouper les maïs d'un type donné dans une plage restreinte d'utilisation du séchoir. Le décalage de floraison s'impose alors non seulement pour limiter les échanges polliniques au champ mais aussi pour éviter les croisement de flux lors de la collecte,
- en vidangeant soigneusement le séchoir entre deux types de maïs.

L'intérêt de cette stratégie est de réduire les investissements matériels et la procédure de contrat permet un bon niveau de traçabilité. Par contre, les risques de croisement de flux ne sont pas négligeables, d'une part parce que le décalage entre deux maïs à la floraison, utilisé pour limiter les fécondations croisées, peut s'estomper à la récolte certaines années, d'autre part parce que les opérations de vidange de séchoir peuvent être assez longues (ITCF⁸).

⁸ D'après l'ITCF, après passage d'un lot dans un séchoir, on retrouve 2-3% de grains de ce lot dans le lot suivant. Il faut ensuite compter entre 10H (séchoirs optimisés) et 15H (anciens séchoirs) pour que la vidange soit complète. Ces temps constituant une moyenne entre le sud de la France (entre 7H et 12H environ) et le nord

Ces différentes logiques décrites pour le maïs pourraient être appliquées sans difficulté au soja. En effet, le soja reste une production limitée en France (aux alentours de 300 000 T) ; les volumes collectés par ECS sont toujours modestes : au maximum 16 000 T soit quelques pour cent de la collecte totale, qui sont, qui plus est, récoltés en septembre, à une période de creux relatif dans l'activité de collecte-stockage. Le soja n'est pas séché systématiquement, cela dépend des conditions climatiques à la récolte. De fait, ces conditions rendent l'isolement et la mise en place d'une traçabilité de l'origine (temps disponible pour l'enregistrement des données) plus faciles. Par exemple, les volumes produits par exploitation agricole étant faibles, les contrats de production peuvent restreindre la production de soja produit sur l'exploitation au soja sous contrat.

Seules les semences restent un point sensible dans le système. En effet l'utilisation de semences de ferme, dont la qualité n'est pas toujours connue, reste majoritaire : entre 60 et 70% au niveau national avec des pics de 80% dans certaines régions (CETIOM). Dans le cadre de contrats de production de sojas spécifiques, l'obligation d'utiliser des semences certifiées qui représentent un coût de 500 à 600 F/ha pour l'agriculteur devrait permettre de s'assurer la qualité du lot final à condition de pouvoir garantir le caractère « sans OGM » des semences. Or, à l'heure actuelle, la production française de semences de soja est très dépendante de l'importation de semences de prébase et base des Etats-Unis et du Canada, parfois contaminées par des variétés OGM⁹. La constitution de filières de soja non-OGM semble donc passer à l'heure actuelle par le développement de la maintenance (production des 1ères générations) en France.

(entre 13H et 21H environ). Le temps de nettoyage dépend du seuil de pureté visé et l'on constate que la mise en place d'une filière non OGM par ce type de logique de collecte suppose qu'elle fasse un volume minimum.

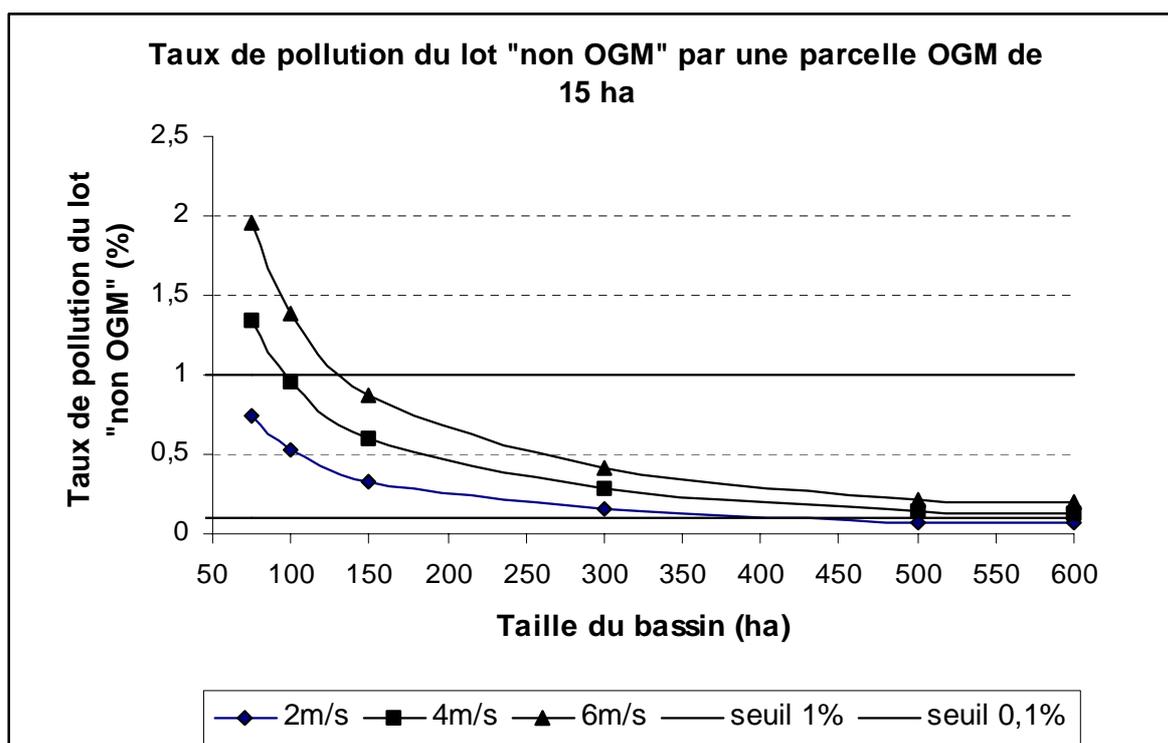
⁹ Comme le montre la destruction début août 2000 de 46 ha de multiplication de semences de la variété Mixer contaminées aux USA par des OGM.

Tableau I5 Ordre de grandeur des taux de contamination du lot non-OGM simulé par le modèle PAP maïs (cf Partie I-1 et II)*

Vent**	2 m/s		4 m/s		6 m/s	
Taux OGM						
2.5%	15 ha 0.070	3 X 5 ha 0.1	15 ha 0.1	3 X 5 ha 0.2	15 ha 0.2	3 X 5 ha 0.3
5%	30 ha 0.15	6 X 5 ha 0.2	30 ha 0.25	6 X 5 ha 0.4	30 ha 0.3	6 X 5 ha 0.55
10%	60 ha 0.2	12 X 5ha 0.45	60 ha 0.35	12 X 5ha 0.85	60 ha 0.55	12 X 5ha 1.2
15%	90 ha 0.25	18 X 5ha 0.7	90 ha 0.5	18 X 5ha 1.3	90 ha 0.75	18 X 5ha 1.9
20%	120 ha 0.35	24 X 5ha 1	120 ha 0.65	24 X 5ha 1.85	120 ha 0.95	24 X 5ha 2.65

*Le bassin entièrement couvert de maïs fait 600 ha. La vitesse du vent et la part d'OGM dans le bassin varient. Enfin on teste deux modalités d'arrangement des parcelles OGM : un seul bloc central ; des parcelles de 5 ha uniformément dispersées. Les ordres de grandeur sont arrondis à 0.05% près.** vitesse moyenne permanente au moment de la floraison (juillet : 2m/s : Beauce, 6m/s vallée du Rhône)

Figure I4 Illustration de l'effet du vent sur le taux de pollution induit par une parcelle d'OGM de taille fixe 15 ha sur des bassins de maïs de taille variable



III Evaluation des risques de contamination à l'aide du modèle de simulation

Un dernier résultat consiste à tester à partir du modèle de dissémination entre parcelles, présenté plus haut (cf. I), certaines procédures de gestion des bassins inhérentes aux logiques de séparation de lots développées ci-dessus (cf. II).

Dans la simulation illustrée par le tableau I5 on suppose que quelques parcelles de maïs OGM sont implantées dans un bassin de 600 ha dont tout le reste de la surface est implantée en maïs « non OGM ». Ces quelques parcelles de maïs OGM peuvent être dispersées dans le bassin ou bien regroupées au centre du bassin. On suppose que les récoltes des parcelles semées en maïs « non OGM » sont réunies en un lot bien isolé dans le système de collecte (parcelles OGM bien identifiées et écartées ; équipement de collecte stockage dédié à la filière donc dans les meilleures conditions de collecte stockage).

Pour des surfaces totales en OGM représentant des taux d'OGM dans le bassin variant de 3% à 20%, le modèle permet d'évaluer des ordres de grandeur du niveau de contamination du lot isolé à partir des parcelles « non OGM ».

Ainsi, pour un vent de 4m/s en moyenne à la floraison, une parcelle de 15 ha au milieu d'un bassin de 600 ha induirait un niveau de contamination du lot « non OGM » proche du seuil de 0.1% et une parcelle de 120 ha un niveau de 0.7%. Par contre, si ces mêmes surfaces en OGM sont dispersées en parcelles de 5ha dans le bassin, la contamination s'aggrave et atteint près de 2 % pour la parcelle de 120ha. La constitution d'îlots paraît donc un moyen précieux de réduction de la dispersion des OGM (ce sont les parcelles d'OGM qui seraient là, regroupées par contrat par exemple), moyen d'autant plus efficace que la proportion d'OGM est forte dans le milieu : avec 20% d'OGM dans le bassin le regroupement en îlot diviserait par près de trois la contamination dans le lot « non OGM » ; quand la part des OGM dans le bassin n'est que de 5% la contamination serait réduite dans la proportion de 2.

La figure I4 illustre l'effet d'un renforcement du vent sur une aggravation du taux d'OGM dans le lot « non OGM ». Quand le vent passe de 2 à 4 puis à 6m/s sur une parcelle de 15 ha d'OGM implantée au milieu d'un bassin de 100 ha, la contamination du lot constitué à partir du reste du bassin passerait de 0.5 à 1 puis à 1.4%. Cet effet du vent s'amenuise lorsque la parcelle d'OGM représente une faible part du bassin.

Ces résultats qui tirent des stratégies d'isolement présentées plus haut, des scénarios d'organisation de bassin de production à simuler, devront être développés d'une part en améliorant la modélisation (son état actuel est présenté dans la partie suivante) et d'autre part en les intégrant plus précisément aux différentes procédures d'isolement étudiées.

DEUXIEME PARTIE

Modélisation des effets des systèmes de culture et du climat sur les pollinisations croisées chez le maïs

F. Angevin, E. Klein**, C. Choimet*, J.M. Meynard *,A. de Rouw***, Y. Sohbi*

* INRA, ** INA-PG, *** IRD

La contamination d'une parcelle de maïs par un transgène peut avoir plusieurs origines :

- des pollinisations croisées entre le champ non OGM et un champ voisin de maïs OGM, cette espèce étant en effet allogame et anémogame,
- des semences contaminées lors de leur production ou au cours de leur conditionnement,
- la présence de repousses issues des précédentes cultures. Dans le cas du maïs dans les systèmes de culture français, ce risque est quasi inexistant et maîtrisable (Cf. Partie II). Il ne sera donc plus évoqué dans la suite de ce texte.

L'objectif de ce travail est de construire un modèle de dissémination du pollen permettant de simuler des conditions climatiques et agronomiques réelles de production de maïs. L'intérêt est alors de pouvoir tester l'effet de différentes techniques culturales sur le taux de contamination de la récolte afin de fournir, par exemple, des recommandations pour le respect d'un seuil. Ce type de modélisation permet aussi d'estimer de façon fréquentielle l'occurrence d'un taux de pollinisation croisée.

Le modèle PAP¹⁰maïs, programmé sous Matlab¹¹, est basé sur la fonction de dispersion du pollen de Klein (2000). Klein (2000) a construit un modèle mathématique pour la dispersion du pollen de maïs à l'échelle d'une saison de dispersion. Ce modèle intègre des paramètres météorologiques et biologiques qui ont été estimés sur une expérimentation de dispersion (expérimentation à l'échelle de la saison de dispersion). La modélisation a porté sur deux points : la modélisation de la dispersion du pollen et des fécondations croisées à l'échelle de la journée (afin de prendre en compte les asynchronismes de floraison entre variétés) et la prise en compte à cette échelle de temps des facteurs agronomiques et climatiques influant sur les paramètres de cette fonction statistique.

Cette partie retrace le travail d'élaboration du modèle, présente les sources d'information (bibliographie, experts) et de données (expérimentations) ayant servi à sa construction ainsi que les hypothèses qu'il fut nécessaire de formuler.

10 PAP : Pollinisation Anémophile sur un Paysage

11 Logiciel de programmation mathématique, une version en C est en cours d'écriture

I. La fonction de dispersion du pollen et ses paramètres

1. La fonction de dispersion (appelée NIG)

Une base expérimentale

La fonction de dispersion du pollen de maïs utilisée dans le modèle a été ajustée par E. Klein (2000) sur des résultats d'expérimentations menées en 1998¹². Ces dernières consistaient en la mise en place dans une parcelle de maïs variété Adonis, sans discontinuité, d'un carré de 20 m sur 20 m de cette même variété, semée à la même date, mais porteuse de façon homozygote d'un allèle de coloration du grain en bleu (pour un gène participant au complexe de gènes codant pour les anthocyanes).

Les mesures des proportions de grains bleus sur des épis échantillonnés dans la zone de maïs jaune ont permis, à l'aide de méthodes statistiques, d'ajuster la fonction de dispersion individuelle du pollen NIG, construite par Klein (2000) sur les données expérimentales.

La fonction de dispersion individuelle

La fonction NIG donne la probabilité qu'un grain de pollen émis par une plante A située en un point (0,0) du champ, féconde les soies d'une plante B située en (x, y). Les conditions d'ajustement de cette fonction de probabilités sont celles qui existaient lors de l'expérimentation : floraison concordante entre les plantes émettrices de pollen et les plantes réceptrices, entre lesquelles il n'y a pas de discontinuité ; la totalité des soies de B est réceptive au pollen de A. Le taux de pollinisation croisée est estimé sur la durée totale de la floraison.

La fonction de dispersion NIG fait intervenir les paramètres biologiques et physiques suivant :

- la direction principale du vent sur la période de floraison (1 paramètre)
- l'intensité moyenne du vent sur la période de floraison (1 paramètre)
- la turbulence de l'air dans les différentes directions (3 paramètres)
- la vitesse verticale de chute d'un grain de pollen en atmosphère non turbulent (1 paramètre)
- la différence de hauteur entre panicule émetteur de pollen et épi récepteur.

Ces paramètres ont été estimés, à partir des résultats expérimentaux de dispersion, dans les conditions de l'expérimentation de 1998 et une comparaison entre les paramètres ainsi estimés et des mesures physiques de ces mêmes paramètres faites en parallèle a montré une relative cohérence. Une première étape de la modélisation présentée dans ce document a consisté à adapter le paramétrage de manière à pouvoir utiliser dans le modèle des données correspondant à d'autres conditions météorologiques lors de la culture.

Utilisation de la fonction de dispersion individuelle pour prédire un motif de dispersion

La fonction de dispersion individuelle décrite précédemment modélise la manière dont une plante au milieu d'un champ disperse son pollen autour d'elle-même. Lorsque plusieurs plantes, de génotypes différents (que ce soit pour un gène marqueur comme dans

¹² Collaboration entre l'Université Paris Sud et l'AGPM, grâce à un financement conjoint GNIS, comité de biovigilance

l'expérimentation de 1998 ou deux génomes différents, comme dans le cas de 2 variétés différentes) dispersent ainsi leur pollen, la proportion de « pollution » observée sur les épis en chaque point du champ va être le résultat de la « dilution » du pollen émis par toutes les plantes « pollueuses » dans la masse de pollen émis par toutes les plantes non pollueuses. Klein (2000) décrit comment utiliser la fonction de dispersion individuelle pour calculer ces proportions de « pollution » en chaque point.

En particulier, si un des deux génotypes considérés produit plus de pollen que l'autre génotype, il faut prendre en compte ce phénomène lors du calcul de la « dilution » d'un nuage pollinique dans l'autre. Cette prise en compte passe par l'introduction du paramètre m qui est égal à la production de pollen relative d'une plante non « pollueuse » par rapport à une plante « pollueuse » (OGM dans le document qui suit). Pour fixer les idées, $m=1$ correspond à une production égale, $m=2$ signifie qu'une plante non OGM produit 2 fois plus de pollen qu'une plante OGM. Ce paramètre m dépend bien sûr des caractéristiques variétales, mais aussi du synchronisme de floraison, comme nous le détaillerons par la suite.

2. Direction et intensité du vent

Le modèle de Klein (2000) considère la direction dominante du vent sur la période de floraison. Le modèle PAP-maïs, permet de conserver cette possibilité qui correspond à un risque maximal pour la végétation sous le vent. Cependant, la programmation est faite de manière à pouvoir prendre en compte la direction journalière du vent¹³ (voir ci-dessous), ce qui reflète mieux la réalité, surtout dans les régions où les vents sont tournants.

La fonction de dispersion a été établie pour un vent moyen sur la floraison d'une vitesse de 2 m.s^{-1} mesurée à 10 m de haut.

L'utilisation d'un profil de vent (Cellier, *comm. pers* ; Allen et al, 1994) permet d'utiliser deux types de données plus facilement accessibles :

- l'intensité moyenne de vent dans le couvert pendant la floraison,
- les données journalières des bases météorologiques STEFCLI.

Il est alors possible de concilier la précision de cette donnée d'entrée avec le type de simulation qui sera effectué : calcul prévisionnel d'un taux de contamination en situation réelle de culture, simulation du taux moyen d'impuretés dans les récoltes dans des contextes agricoles représentatifs d'un type de production, d'une région, etc.

3 Différence de hauteur entre épi récepteur non OGM et panicule émetteur de pollen OGM (h)

Dans les conditions de l'expérimentation 1998, la différence de hauteur entre le panicule et l'épi de la variété Adonis est de 0,831 m. Il s'agit d'une différence spécifique à chaque variété. Ces caractéristiques sont mesurées lors des procédures DHS¹⁴ d'inscription. Les résultats communiqués par le GEVES¹⁵ concernent les variétés suivantes :

¹³ Par exemple, utilisation des données des bases STEFCLI, relevés du réseau de stations météo de l'INRA.

¹⁴ DHS : Distinction, Homogénéité, Stabilité

¹⁵ GEVES : Groupe d'Etudes et de contrôle des Variétés Et des Semences

Figure III1 : Organigramme du modèle PAP maïs

24

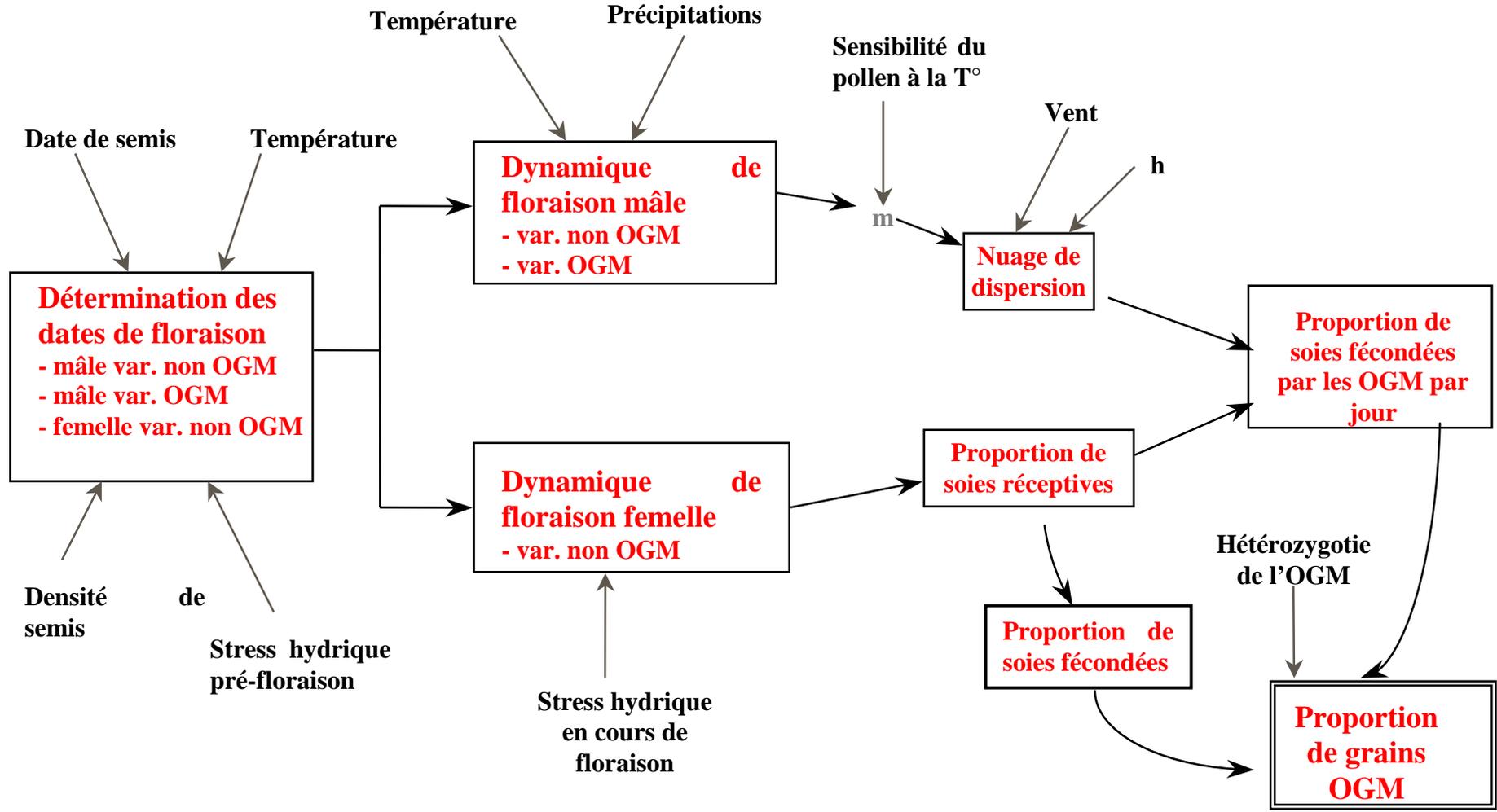


Tableau III : Exemples de données GEVES permettant de calculer le paramètre de différence de hauteur entre fleurs mâles et femelles

Variété	Hauteur Panicule en cm	Hauteur Epi en cm
Alienta	277	102
Alvina	266	113
Anjou 258	241	85
Anjou 285	233	74
Antarès	223	74
Aprilia	237	87
Cécilia	289	128
DK 212	215	78
DK 312	252	97
DK 604	286	130

Variété	Hauteur Panicule en cm	Hauteur Epi en cm
Dunia	278	107
Etendard	245	100
Fanion	226	80
LG 2450	275	107
Manatan	214	84
Naudi	272	108
Pactol	234	78
Prinz	229	90
Samsara	268	102

Les paramètres de la fonction de dispersion NIG ont été modifiés pour prendre en compte cette différence de hauteur.

4. Le paramètre m

Le paramètre m permet la prise en compte du rapport entre la quantité de pollen OGM et non OGM émise par chaque plante OGM et non OGM.

La bibliographie étudiée (voir ci-dessous) a montré que des facteurs agronomiques et climatiques jouent sur la dynamique de floraison mâle du maïs mais aussi sur la viabilité du pollen. Ils influent donc sur ce rapport et ce, de façon variable chaque jour de la floraison.

5. Objectif des adaptations du modèle existant

Certaines adaptations simples ont permis de prendre en compte des variables caractéristiques des situations de production. Cependant, le modèle de dispersion initial ne pouvait reproduire les effets des décalages de floraison qui peuvent exister entre variétés, ni ceux des facteurs climatiques sur les organes reproducteurs du maïs.

L'objectif du travail effectué a donc été de modéliser la composition du nuage pollinique (calcul de "m") ainsi que la proportion de soies réceptrices chaque jour en tenant compte de l'influence de ces facteurs (Cf. figures II.1 et II. 2).

Pour évaluer "m" à un pas de temps journalier, plusieurs types de données ont été collectés :

- le potentiel de production de grains de pollen,
- l'effet des facteurs climatiques sur l'émission et la viabilité du pollen,
- la date de début floraison mâle,
- la dynamique de floraison mâle du maïs : quel pourcentage de la quantité totale de pollen produit par une plante est émis le $j^{\text{ième}}$ jour de floraison ?

Figure II2 : Données d'entrée du modèle PAP maïs

■ **Structure spatiale**

- Formes et tailles des parcelles
- Localisation des plantes OGM

■ **Facteurs climatiques (journaliers)**

- Température
- Précipitations
- Vent : intensité & direction

26

■ **Paramètres de la dispersion**

- Différence de hauteur entre panicule OGM et soie réceptrice (h)

■ **Système de culture**

- Densités et date de semis
- Stress hydrique avant floraison
- Stress hydrique en cours de floraison

■ **Paramètres variétaux**

- Quantités de pollen produites
- Sensibilité du pollen à la température
- Besoins en température entre semis et floraison
- Hétérozygotie de la variété OGM

Pour estimer jour par jour la réceptivité des soies, il faut connaître :

- le nombre de soies par inflorescence femelle
- l'effet des facteurs climatiques sur la réceptivité des soies et leur capacité à être fécondées.
- La date de début de floraison des fleurs femelles
- la dynamique de floraison femelle du maïs : quel pourcentage de la quantité totale des soies produites par une plante devient récepteur le j^{ième} jour de floraison ?

Le taux de contamination donné par le modèle correspond au calcul d'un ratio global à la fin de la floraison : « ovules fécondés par du pollen transgénique / ensemble des ovules fécondés ».

Ce n'est pas le taux à la récolte qui est simulé car les accidents de remplissage des grains après fécondation ne sont pas pris en compte. On peut cependant supposer que les accidents de nouaison touchent de même manière les grains OGM et non OGM et considérer que la donnée du sortie du modèle est une estimation du taux d'impuretés dans la récolte.

II. Dates de début de floraison

1. Floraison femelle

La date de début de floraison est déterminée à partir de la date de semis par un calcul de somme de degrés-jours (en base 6). Chaque année l'AGPM réactualise ces sommes pour les principales variétés cultivées. La gamme de précocité de floraison utilisable dans le modèle va de 775 °jours (Altor, Amélie) à 1075 °jours (Tador NK 75) (AGPM, 2000).

Tableau II2 : Précocité de floraison de quelques variétés

Variété	Besoins en °j entre semis et début floraison
Alienta	1040
Alvina	1015
Cécilia	1040
DK 312	940
DK 604	1040
Dunia	1015
LG 2450	990
Naudi	1015
Samsara	1015

Source : AGPM (2000)

2. Floraison mâle

En général la floraison mâle du maïs commence quelques jours avant la floraison femelle. Cet écart entre le début de l'anthèse - généralement concomitant au début de la libération du pollen - et la sortie des premières soies s'appelle la protandrie.

Elle a un effet important sur le potentiel de fécondation (Dijkhuis & Duplessis, 1967).

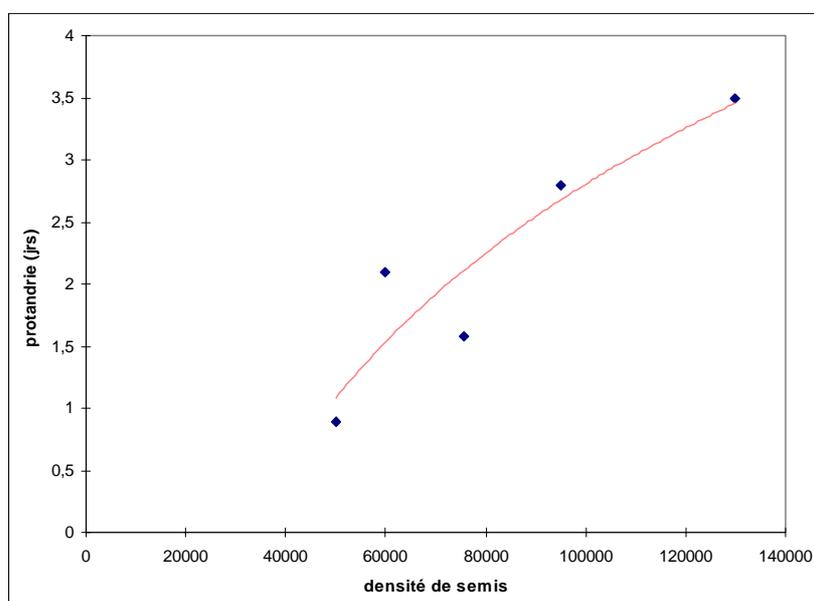
Deux sources d'informations ont servi à estimer les gammes de protandrie intégrées dans le modèle : les résultats publiés dans la bibliographie et les résultats des procédures DHS.

Résultats bibliographiques

La bibliographie souligne l'importance de la densité de semis et du stress hydrique préfloraison.

Boyat *et al.* (1983, 1990) montrent que la densité de semis a un effet sur la protandrie en l'absence de stress hydrique. La relation qu'ils ont établie peut être résumée par la figure ci-dessous :

Figure II3 : Effet de la densité de semis sur la protandrie



Ce qui peut être synthétisé par le tableau suivant (en absence de stress hydrique) :

Tableau II3 : protandrie en fonction des gammes densités de semis

Densité	40-60 000 plantes/ha	60-90 000 plantes/ha	> 90 000 plantes/ha
Protandrie	1 jour	2 jours	3 jours

Herrero & Johnson (1981) montrent l'influence du stress hydrique sur la protandrie. Avec une densité de semis de 50 000 plantes/ha, les protandries suivantes sont observées :

Tableau II4 : Effet du stress hydrique sur la protandrie

Intensité du stress hydrique	Protandrie
Pas de stress (-7 à - 11 bars)	0,6 jour
Stress modéré (-11 à - 16 bars)	3,8 jours
Stress sévère (- 16 à - 18 bars)	4,5 jours

Pour les variétés considérées dans cette étude, nous avons construit le tableau synthétique suivant :

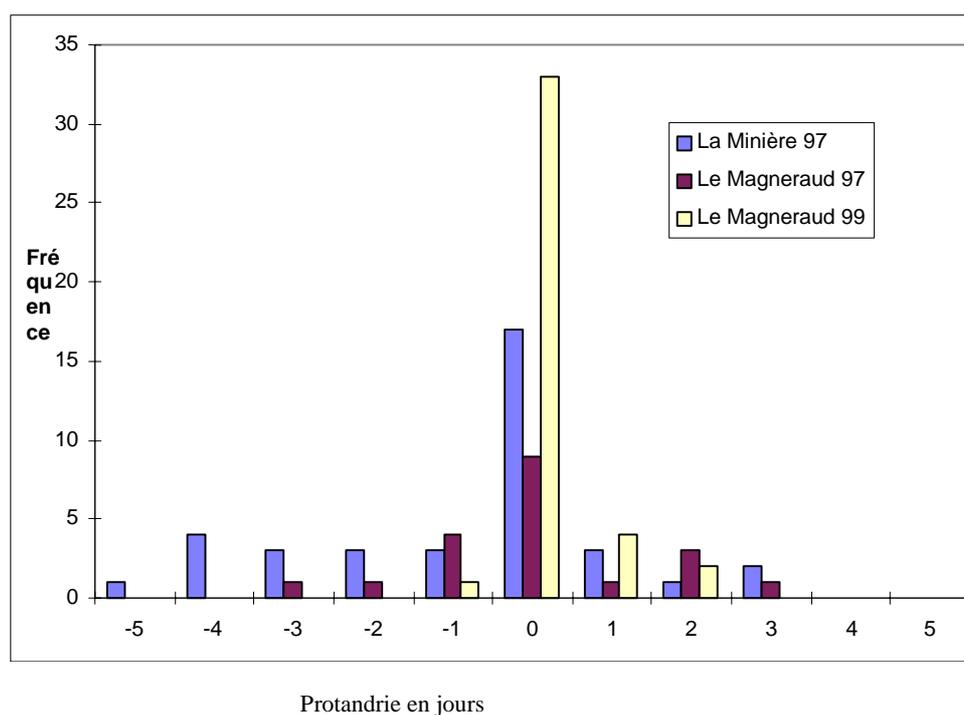
Tableau II5 : Effet des densités des semis et du stress hydrique sur la protandrie

	Densité de semis		
<i>Stress hydrique</i>	40-60 000 plantes/ha	60-90 000 plantes/ha	> 90 000 plantes/ha
<i>Nul</i>	1	2	3
<i>Modéré</i>	3	4	5
<i>Sévère</i>	4	5	6

Résultats des procédures DHS

Les données mesurées lors de la procédure de DHS sont une deuxième source d'information. La protandrie a été mesurée plante à plante sur Anjou 258. Les histogrammes suivants ont été obtenus :

Figure II4 : histogramme de fréquence des protandries sur les essais DHS analysés



On observe ici des protandries négatives. La protandrie moyenne est nulle alors que d'après les données tirées des références ci-dessus, elle devrait être d'une journée. D'après les experts consultés (M. Guérin, GEVES et M. Panouillé, INRA), cette différence s'explique par l'évolution du matériel génétique ces dernières années. En effet, afin de pouvoir augmenter la densité de semis et donc le potentiel de rendement, les sélectionneurs ont introduit du matériel provenant de variétés prolifiques (à 2 épis en conditions standard qui permettent de conserver un épi par plante à forte densité), naturellement moins protandres. En

outre, la tendance est à la sélection de variétés protogynes afin que l'allocation de l'azote se fasse à l'épi plutôt qu'au panicule.

Boyat *et al.* (1983) obtiennent comme protandries pour des hybrides prolifiques les valeurs suivantes (en l'absence de stress hydrique) :

Tableau II6 : Protandries pour des hybrides prolifiques

Densité de semis	50 000 plantes/ha	75 750 plantes/ha
Protandrie	0,16 jour	0,66 jour

Nous avons donc choisi de baisser l'ensemble des chiffres proposés ci-dessus d'un jour. Le tableau retenu dans PAPmaïs est donc le suivant :

Tableau II7 : Protandries utilisées dans le modèle

<i>Stress hydrique</i>	Densité de semis		
	40-60 000 plantes/ha	60-90 000 plantes/ha	> 90 000 plantes/ha
<i>Nul</i>	0	1	2
<i>Modéré</i>	2	3	4
<i>Sévère</i>	3	4	5

L'étape suivante a consisté en l'étude des dynamiques de floraison et des facteurs influençant la production de pollen et la réceptivité des soies.

III. Production et viabilité du pollen

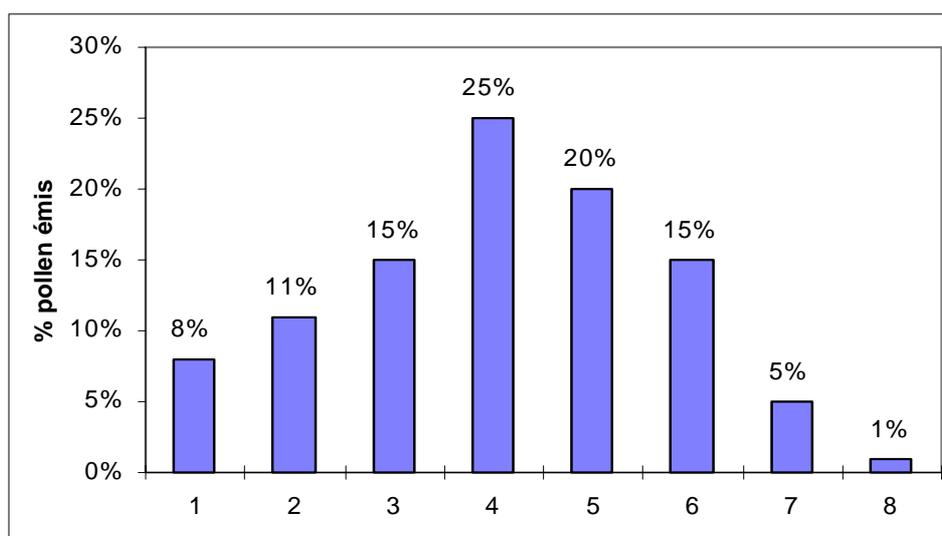
1. Dynamique journalière de floraison mâle

Aucun article scientifique n'a pu être trouvé sur le sujet.

Nous avons eu à notre disposition plusieurs sources de données de terrain :

- Le mémoire de fin d'étude de Cazenave (1999) rapporte des comptages journaliers de grains de pollen dans des pochages de panicules pour différents dispositifs expérimentaux. Pour chacune des six séries de données disponibles, nous avons calculé la proportion de pollen émis chaque jour de floraison puis nous avons fait la moyenne des données obtenues :

Figure II5 : Pourcentage de pollen émis en fonction du jour de floraison

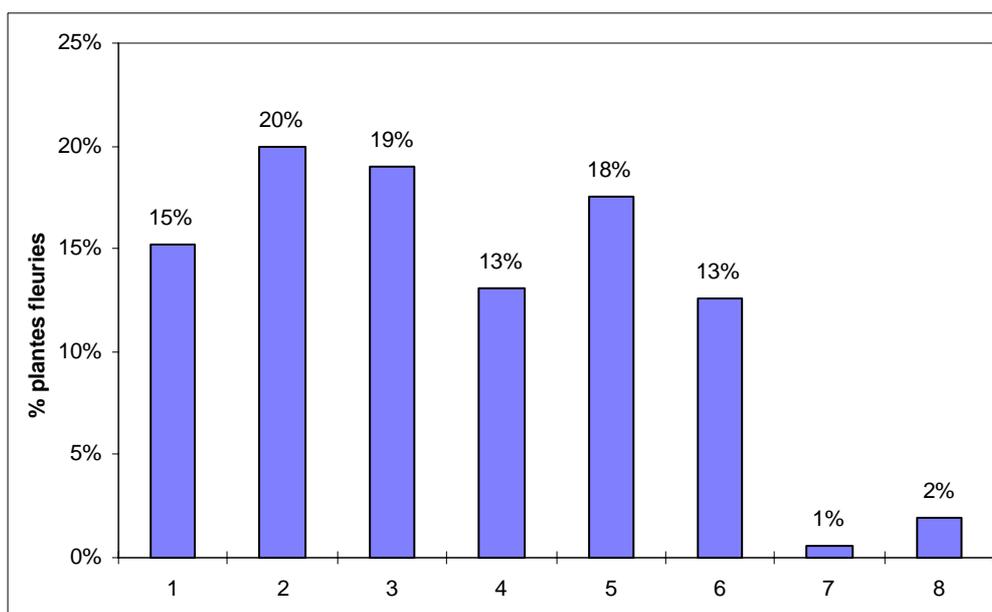


Ce type de répartition se retrouve fréquemment lors de la description de phénomènes biologiques. Néanmoins, d'après certains experts consultés (M. Foueillassar, AGPM et M. Girardin, INRA), le démarrage de la libération de pollen est assez brutal, ce qui n'est pas vraiment décrit par la figure.

- Les résultats des essais DHS donnent des comptages journaliers de plantes qui commencent à émettre du pollen (stade 1/3 des anthères sorties). Nous disposons de quatre séries de données sur Anjou 258 en 1997 et 1999. De manière générale, les schémas d'émissions sont très variables et ceci est probablement dû à l'effet des facteurs climatiques.

L'histogramme suivant est obtenu en faisant la moyenne des différentes séries :

Figure II6 : Pourcentage de plantes fleuries en fonction du jour de floraison

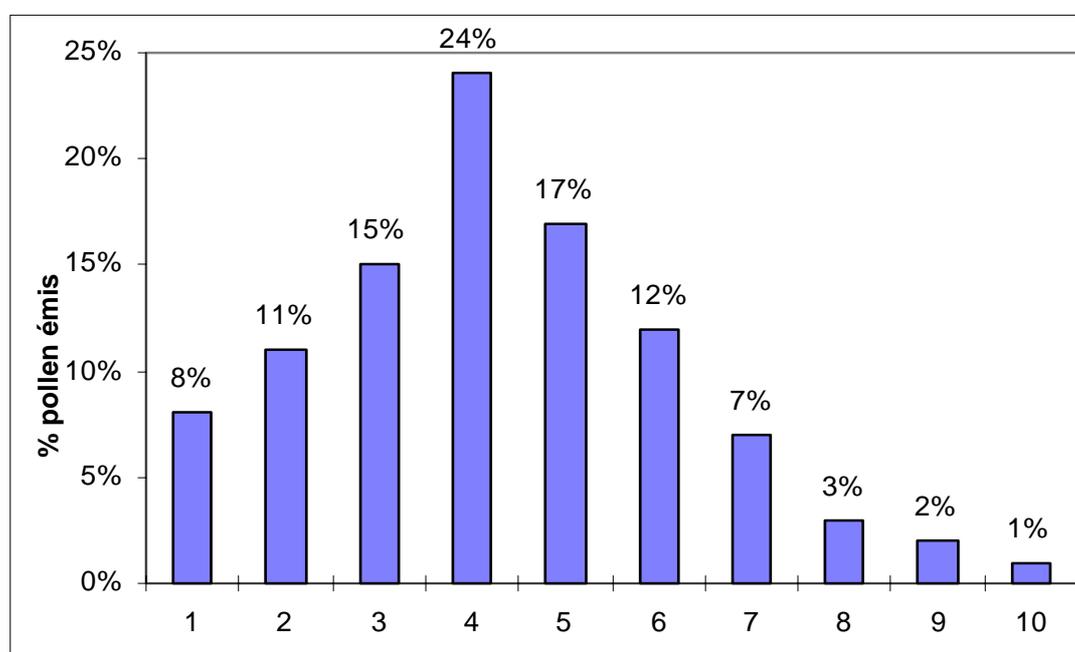


Cette figure représente mieux le démarrage brutal mentionné plus haut.

D'après M. Guérin (GEVES), cette courbe refléterait bien la floraison des panicules mais pas l'émission de pollen car elle ne tiendrait pas compte du rythme de floraison des panicules. Un panicule met en effet 3 - 4 jours pour libérer l'ensemble de ses anthères ; le haut du brin maître fleurit avant les ramifications. Le démarrage de floraison ne serait donc pas aussi brutal que considéré auparavant. En définitive, suite aux divers avis, c'est la forme de la courbe de Cazenave qui a été retenue dans la construction du modèle en allongeant la durée d'émission du pollen à 10 jours (Cf. Figure II7)

Malgré les avis divergents, dans le contexte de l'étude, nous avons retenu cette hypothèse de travail car elle est conservatrice : en augmentant les risques de contamination elle conduira à choisir d'éventuels décalages de floraison plutôt trop longs que trop courts.

Figure II7 : Dynamique de floraison mâle dans PAPmaïs



2. Quantités de pollen produites par variété

Les variétés n'ont pas toutes le même potentiel de production de grains de pollen ; or, les simulations effectuées avec le modèle de Klein (2000) montrent que les différences de quantités de pollen produites par les variétés ont un effet marqué sur les résultats. Les experts (M. Viallet, Limagrain et M. Foueillassar, AGPM) ont donné comme ordre de grandeur :

- 0,8 à 2 millions de grains de pollen pour les lignées,
- de 6 à 8 millions de grains de pollen pour les hybrides.

L'AGPM a mis en place des expérimentations pour évaluer les quantités de pollen produites par les principales variétés cultivées en France. Les résultats obtenus sont très variables entre variétés et entre années pour une même variété (X. Foueillassar, *comm. pers.*)

Actuellement, les quantités de pollen produites par les variétés OGM et non OGM sont entrées par l'utilisateur. A terme, lorsque des références seront établies et publiées, elles seront intégrées dans la base de données de description des caractéristiques variétales incluse dans le programme.

3. Effet des facteurs climatiques sur le pollen

La libération du pollen n'a pas lieu en cas de pluie faute de déhiscence des assises mécaniques des anthères (Girardin, 1999). En outre, le pollen éclate s'il arrive sur une soie humide. En revanche, une hygrométrie minimale (non quantifiée) est nécessaire à l'ouverture des glumes et constitue un prérequis à la libération des anthères (A. Panouillé, *comm. pers.*).

Le schéma d'émission du pollen dans la journée dépendrait des régions considérées (D. Guérin, *comm. pers.*). Par exemple, le degré d'hygrométrie nocturne (présence ou non de rosée) déterminerait l'émission de pollen la nuit.

Les références bibliographiques affectent souvent une durée de vie de 2 heures au pollen. Cependant, les experts consultés (MM. Guérin et Panouillé) l'évaluent à 6 heures minimum. Certaines études des années 50 indiqueraient que le pollen reste viable jusqu'à 36 heures en conditions optimales ($T^{\circ}=22-23^{\circ}\text{C}$, hygrométrie = 80 %). Cependant les experts s'accordent à dire qu'en conditions de culture, le pollen est viable, pendant moins de 24 heures, ce qui simplifie la prise en compte de l'émission du pollen dans ce modèle au pas de temps journalier.

La température a un effet important sur la viabilité du pollen ; le stress hydrique n'a qu'un effet limité (Lambert *et al.*, 1986).

L'effet de la température sur le pollen dépend étroitement de la variété considérée, comme le montrent les données d'Herrero et Johnson (1980) dans des expériences *in vitro* sur 15 géotypes américains :

Tableau II8 : Viabilité du pollen en fonction de la température

		% de pollen viable		
		Moyenne	Minimum	Maximum
<i>Témoin (champ)</i>		53%	38%	79%
$T^{\circ} > 32^{\circ}\text{C}$	Pendant 24 h	44%	18%	74%
	Pendant 48 h	30%	14%	59%
$T^{\circ} > 38^{\circ}\text{C}$	Pendant 24 h	12%	3%	35%
	Pendant 48h	1%	0%	6%

Faute de données existantes pour les variétés cultivées en France, cet effet n'est pris en compte dans le modèle que par la saisie par l'utilisateur d'un paramètre "p", représentant le différentiel de sensibilité du pollen à la température entre la variété non OGM et la variété OGM.

A défaut de pouvoir quantifier la quantité minimale de pollen nécessaire à la fécondation, nous n'avons retenu comme effet du climat sur le pollen que les deux règles de décision suivantes :

- ➔ pas de libération du pollen en cas de pluie,

- pas de fécondation si la température est supérieure à 38°C pendant plus de 48 h. Cette dernière valeur devra être confirmée par la suite car certains experts mentionnent 32 - 33°C, d'autres 40°C.

IV. Réceptivité des soies

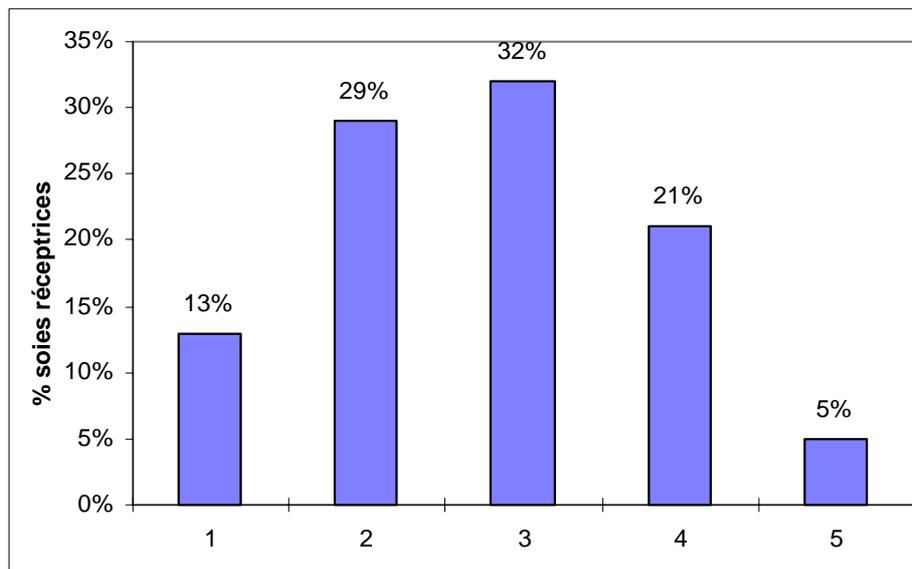
Le module de dispersion adapté des travaux d'Etienne KLEIN donne la proportion de grains de pollen issus des plantes OGM dans le nuage de pollen de chaque fleur femelle. Celui-ci doit être confronté au pas de temps journalier avec la proportion de soies réceptrices afin d'obtenir la proportion de grains contaminés formés chaque jour.

1. Dynamique de floraison femelle

Les données à ce sujet sont extrêmement limitées.

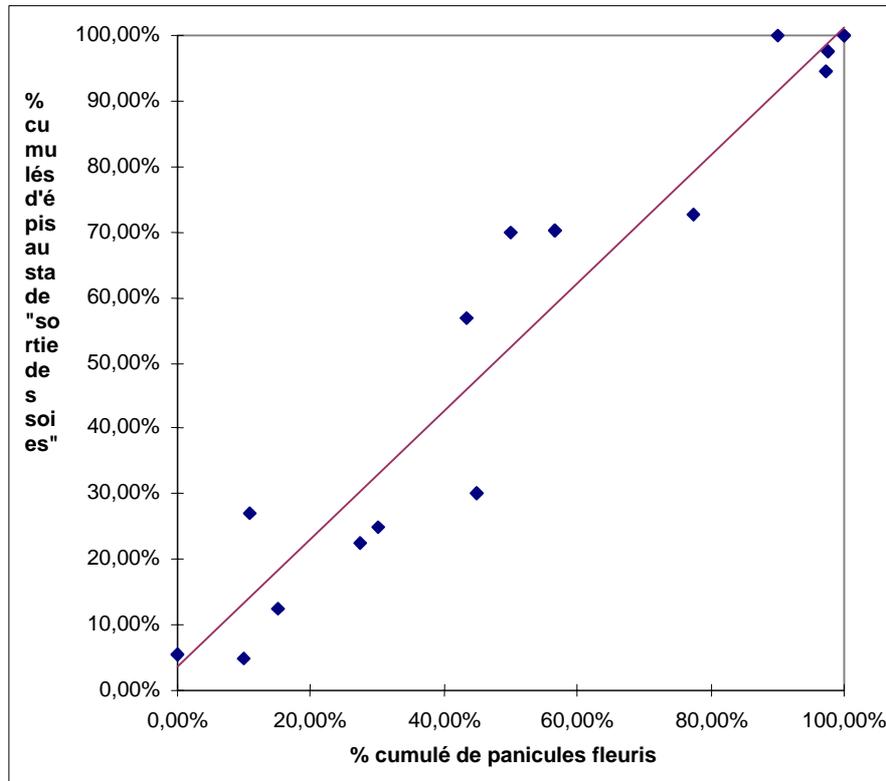
La bibliographie trouvée se limite à un article : El-Hout & Blackmer (1990), repris dans *Ecophysiologie du maïs* (Girardin, 1999). Cet article donne un histogramme d'évolution du pourcentage cumulé de plantes ayant atteint le stade "sortie des soies". Il est possible d'en déduire le pourcentage de soies atteignant ce stade chaque jour (Figure II.8).

Figure II8 Pourcentage de plantes atteignant le stade « sortie des soies » chaque jour de la floraison femelle



Les résultats des mesures réalisées en DHS ont là encore été valorisés. Pour une variété peu protandre (Voir ci-dessus § II. 2), une nette corrélation entre les floraisons mâle et femelle existe ($R^2 = 0.93$), comme le montre la figure suivante :

Figure II. 9.



Le choix a donc été fait d'appliquer aux soies la même dynamique de floraison que pour l'émission de pollen. Ceci est partiellement soutenu par l'avis de M. Guérin pour qui le démarrage de sortie des soies est moins rapide que la sortie des panicules et correspond donc à une courbe de type gaussien.

Cependant, la courbe retenue pourrait correspondre à une floraison femelle dans les zones de production du Nord de la Loire. Dans le Sud, la floraison serait plus rapide, de l'ordre de cinq jours et correspondrait donc davantage à la courbe tirée de El-Hout & Blackmer (1990).

2. Effet du climat sur la croissance et la réceptivité des soies

La bibliographie (Bassetti & Westgate, 1993 ; Herrero & Johnson, 1981 ; Lambert *et al.*, 1986) montre que c'est surtout l'alimentation en eau qui a une influence sur la réceptivité des soies *via* leur turgescence.

La température aurait un impact limité. Aucune étude sur l'effet de l'hygrométrie de l'air sur la croissance des soies n'a pu être trouvée ; néanmoins, l'excellente concordance entre les floraisons mâle et femelle observée sur les données DHS suggère un mécanisme commun entre les deux, qui pourrait être l'hygrométrie.

D'après Bassetti & Westgate (1993), si il y a un stress hydrique dans les 3-4 jours après la sortie d'une soie, son potentiel de fécondation chute de 40% mais sa durée de réceptivité, normalement de 7 jours, est allongée à 8 jours. En revanche, si le stress a lieu 5 jours ou plus après la sortie des soies, la croissance du tube pollinique à l'intérieur de la soie est ralentie et

le tube pollinique ne peut atteindre l'ovule avant la constriction de la base de la soie (sénescence) ; la fécondation est donc impossible.

En ce qui concerne le modèle, nous avons pris comme hypothèse qu'une soie est normalement fécondée dans les 24 heures après sa sortie s'il y a du pollen. Les conditions pour lesquelles le pollen peut être insuffisant un jour "j" sont :

- Des précipitations,
- Une température $> 38^{\circ}\text{C}$ les jours "j" et "j-1",
- Une floraison des panicules terminée (protandrie ou décalage de floraison importants).

Si une soie n'est pas fécondée à sa sortie hors des spathes, elle peut l'être pendant sa durée de réceptivité. Celle-ci est par défaut de 7 jours. Comme vu précédemment, elle peut être de 5 ou 8 jours selon le positionnement d'un stress hydrique dans la vie de la soie. Face à la difficulté d'estimer le stress hydrique journalier, nous avons choisi d'avoir un stress hydrique moyen sur la période floraison femelle. Dans le modèle, la durée de réceptivité des soies est pour l'instant de 5 ou 8 jours, ce qui a été validé par M. Guérin.

Le modèle est néanmoins évolutif et pourrait être affiné avec un module de calcul du stress hydrique journalier. Cependant, il n'est pas certain que l'influence de ce type de stress sur les résultats de contamination soit très importante.

L'étape suivante a consisté à vérifier la cohérence globale de la modélisation effectuée.

Dans un premier temps, ce sont les situations expérimentales qui ont été simulées avec PAPmais afin de tester la pertinence des choix faits pour le passage au pas de temps journalier. Les comparaisons des figures de dispersion observées et simulées sont bonnes. Ensuite, une étude de sensibilité a ensuite été réalisée pour s'assurer de la fidélité de représentation des phénomènes modélisés (influence du vent, d'une différence de productivité de pollen, d'un décalage de précocité de floraison). Elle a été concluante.

Une des limites actuelles du modèle PAPmais est que la fonction NIG a été établie pour des dispositifs continus. Elle ne traduit pas le comportement du pollen de maïs au-dessus du sol nu ou au dessus d'autres types de couvert. Des expérimentations ont été mises en place en 1999 et 2000 pour permettre la modélisation de ces types de discontinuités. Les résultats sont en cours de traitement. A l'heure actuelle, un chemin, du sol nu ou un champ d'une autre culture est considéré comme une parcelle de maïs ne comportant ni panicule émetteur ni épi récepteur

Une procédure de validation du modèle est entreprise en 2001 en collaboration avec l'AGPM grâce à un réseau d'essais de situations de production de semences et de maïs doux.

TROISIEME PARTIE :

Diversité des systèmes d'isolement des lots de céréales en entreprises de collecte-stockage

M. le Bail*, C. Choimet**

* INA-PG, **INRA

Deux phénomènes donnent aux Entreprises de Collecte-Stockage (ECS) françaises un rôle très stratégique dans les filières de grandes cultures de produits de base. Ces organismes sont d'abord au carrefour d'une offre très dispersée et d'une demande de plus en plus concentrée. Ils assurent la concentration dans l'espace et l'étalement dans le temps d'une offre livrée sur un ou deux mois. Ce rôle a été fortement soutenu en France par les réglementations sur les échanges de céréales (Moulias 1986). Le second phénomène est l'adaptation de ces organismes aux conditions du marché. Dans un pays fortement exportateur dans les années 80 les ECS ont développé des capacités de stockage adaptées au traitement de gros volumes. Les années 90 sont marquées par un revirement sur les marchés et voient se développer une forte différenciation des marchés internes à la CEE, occasion stratégique de se différencier et d'acquies de la valeur ajoutée que les ECS cherchent à saisir en développant des politiques de qualité (Heintz 1994; Nicolas 1990).

Passage obligé des flux de céréales et entreprises orientées vers une plus grande segmentation de leurs débouchés, les entreprises de collecte stockage apparaissent donc comme un niveau d'étude particulièrement névralgique pour évaluer les risques de contamination de lots "non OGM" réclamés par les filières.

Cette évaluation suppose de répondre à trois questions :

- Quelle est la diversité des modalités d'isolement de lots de maïs et de soja dans le processus de collecte et de stockage entre la sortie du champ et la sortie des entreprises de collecte stockage ?
- Quels sont les points de ce process où les risques de pollution entre lots d'une même espèce sont les plus importants ?
- Quelles sont les variables d'action essentielles des dispositifs mises en œuvre pour maîtriser ces risques ?

I Schéma conceptuel

Pour éclairer ces questions nous avons étudié dans les entreprises de collecte stockage l'organisation des dispositifs associés à la fabrication de lots de maïs et de soja adaptés à une grande diversité de débouchés. Ces dispositifs sont inclus dans les politiques de qualité des ECS dont l'importance se traduit par l'apparition de services ad hoc proposés aux clients (sécurité sanitaire, homogénéité-régularité, diversification de l'offre, connaissance du produit et des techniques de production...)(Nefussi 1999).

Pour remplir leurs objectifs, ces politiques prennent la forme d'instruments techniques, économiques et de gestion adaptés aux spécificités des entreprises. Heintz (1994) étudiant les modèles d'entreprise de collecte stockage émergeant sur les marchés du blé dans les années 90, définit la qualité comme une convention économique résultant des formes de transaction entre l'entreprise, ses fournisseurs et ses clients.

Schéma III1 Différentes phases de transformation des récoltes parcellaires en lots stockés. D'après W. Heintz 1992

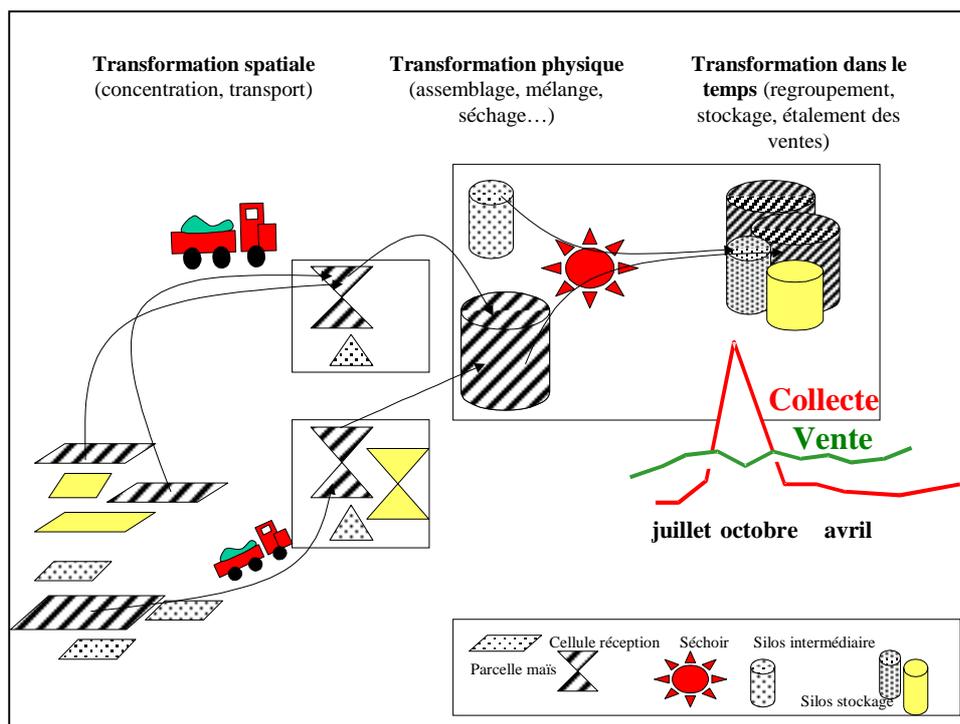


Tableau III1 : Nombre d'entreprises enquêtées selon les 2 axes d'échantillonnage pour le maïs et le soja

Collecte	< 100 000 T	100 – 300 000 T	300 – 600 000 T	> 600 000 T
% soja				
< 1%	1	0	0	3
1 – 3%	1	1	1	0
> 3% (max : 5%)	1	3	2	0
% maïs				
< 20%	3	2	1	0
20 – 50%	1	3	3	0
50 – 85%	0	0	1	1
> 85%	2	3	1	2

Certaines entreprises collectent du maïs et du soja, ce qui explique que le total du tableau dépasse 23.

Pour décrire la diversité des ECS au titre de leurs politiques de qualité, il élabore un schéma général de fonctionnement comprenant trois phases : les relations avec les utilisateurs du blé ; les relations avec les producteurs agricoles et l'organisation interne des entreprises. Il caractérise l'activité de collecte-stockage comme une véritable activité de transformation des récoltes parcellaires en lots commercialisables (assemblage orienté), comportant trois phases (Valceschini et Heintz 1990) : (i) le transfert dans l'espace des produits des parcelles aux points de collecte puis aux silos de stockage ; (ii) la transformation physique de certaines caractéristiques par le séchage, la séparation, le mélange, la ventilation ; (iii) le transfert dans le temps d'une récolte faite sur un temps court pour être mise à disposition des utilisateurs toute l'année via le stockage (Schéma III1).

Précisant le fonctionnement du système de production de lots, Le Bail (1997) identifie différents leviers d'action de l'agronome dans ce système en étudiant les règles de décision des acteurs au cours de la collecte et du stockage. On y décrit une transformation des flux physiques (quantitative et qualitative) sous l'influence de trois types de variables : (i) des variables de structure globalement stables sur un cycle de production ; (ii) des variables aléatoires qui influencent les décisions des acteurs au cours du cycle de production et que l'on cherche à anticiper par des modèles ; (iii) des variables d'action qui permettent soit de planifier le process pour l'année soit de piloter en cours de cycle en fonction de l'aléa pour se rapprocher des objectifs.

Ces approches nous ont fourni un cadre général pour enquêter les entreprises de collecte stockage concernées par le maïs et le soja et pour répondre aux trois questions évoquées en fin d'introduction.

II Matériel et méthodes

Afin d'appréhender les différentes modalités de flux et les fonctions intervenant dans l'isolement, des enquêtes ont été réalisées auprès de 23 entreprises de collecte et de stockage. Le processus de recueil de données et de validation des résultats a été, par ailleurs, appuyé par un groupe de travail interactif composé d'une vingtaine de membres d'organisations professionnelles agro-alimentaires associées dans le projet de recherche global (associations de consommateurs, entreprises de collecte, de transformation, semenciers, représentants des industries des phytosanitaires et des engrais, instituts techniques et groupements interprofessionnels, services du ministère de l'agriculture, ...).

Les entreprises enquêtées ont été choisies (Tableau III1) en faisant varier deux paramètres accessibles dans les statistiques disponibles et dans les références des instituts techniques impliqués dans le projet. Ces variables sont susceptibles d'influer sur les capacités et sur les stratégies d'isolement : le volume total de grains collectés et la part du maïs et/ou du soja dans la collecte.

Les entreprises enquêtées représentent environ 28% de la collecte française de maïs (58% de la collecte de maïs en Aquitaine Midi-Pyrénées, 43% de la collecte alsacienne) et 42% de la collecte de soja.

On a également cherché à enquêter des entreprises de statut varié (coopératives et négoce), qui entretiennent avec les agriculteurs des rapports de nature différente. Néanmoins les négoce rencontrés sont peu nombreux (8 cas sur 23) et de taille importante : collecte de 120000T en moyenne sur l'échantillon contre 25 000 T pour la moyenne de la profession. On traduit donc mal les difficultés spécifiques des toutes petites structures.

Enfin, deux séries d'enquêtes ont été menées.

Dans un premier temps (juin 99), 8 ECS ont été enquêtées dans la région Aquitaine Midi-Pyrénées, première région productrice de maïs (38% de la production nationale) et de soja (77% de la production nationale). A défaut de pouvoir observer des procédures d'isolement spécifiques de produits avec ou sans OGM (une seule entreprise sur 8 avait déjà une filière soja sans OGM), les enquêtes se sont concentrées sur les produits dits « spéciaux ». Ces produits nécessitent la mise en place d'une organisation différente de celle utilisée pour les produits destinées à l'export ou à l'alimentation animale afin de répondre à une demande très spécifique de l'aval et leurs volumes sont généralement restreints :

- Le maïs “waxy” est destiné à l'amidonnerie. Il s'agit de variétés particulières dont l'amidon est constitué en totalité par l'amylopectine. Au séchage à basse température, demandé par les amidonniers, s'ajoute une exigence de pureté variétale des lots qui doit être de 96% minimum et peut être facilement déterminée par un test colorimétrique à l'iode.
- Le “maïs gavage”. Les spécifications fluctuent en fonction des clients en aval. Ceux-ci recherchent des lots à teneur en amidon élevée et avec une faible présence de mycotoxines. Leur demande porte le plus souvent sur certaines variétés (Cécilia par ex.), un séchage doux effectué rapidement après récolte et éventuellement un traitement antifongique après séchage.
- Le “maïs riche” en huile est destiné à l'alimentation animale ; il s'agit de variétés particulières dont la teneur en huile est supérieure à 6%.
- le “soja alimentaire” (destiné à la fabrication de lait de soja), de variétés Imari ou Mixer (pureté variétale exigée de 100 % puisque le soja est quasiment autogame) plus riches en protéines, exempt de graines toxiques (morelle),
- le “soja de pays” mis en place par Glon Sanders, Bourgoin, Feed Alliance et Sofiprotéol. Les spécifications portent essentiellement sur les modes de production : production à distance des autoroutes et centres de pollution, pas d'épandage de boues de station d'épuration, suivi de l'itinéraire recommandé par le CETIOM. Les lots doivent être tracés.
- Les semences font l'objet d'une certification. Leur modes de production au champ (isolement des parcelles, date et densité de semis, désherbage, nettoyage du matériel, castration et récolte en épi pour le maïs, ...), de collecte, de stockage et de contrôle (réalisés par les agents du SOC¹⁶) sont définis par le GNIS¹⁷ à travers les règlements techniques de la production, du contrôle et de la certification des semences et sont fixées par contrat entre l'agriculteur et l'établissement multiplicateur. Enfin, pour être certifiés, les lots de semences doivent satisfaire à des critères de pureté spécifique, de pureté variétale (99% pour le soja, non défini pour le maïs), de faculté germinative (80% pour le soja, 90% pour le maïs), d'humidité et de qualité sanitaire.

Le guide d'enquête utilisé lors de cette première phase s'appuie sur les schémas conceptuels vus plus haut. Il permet de saisir un angle stratégique par les objectifs dévolus à l'activité de collecte stockage à différentes échelle de temps, un angle relationnel qui approfondit les modalités de transaction entre acteurs (agriculteurs, ECS, client) et un angle technique qui détaille le fonctionnement des flux physiques dans le système. Le guide d'enquête comporte trois parties :

- la politique relationnelle avec l'aval : quelles sont les exigences de l'aval (caractéristiques du produit, date et lieu de livraison, traçabilité, assurance qualité) et par quelles procédures sont-elles formalisées (courtiers, contrats, primes, possibilités de planification) ?

¹⁶ Service Officiel de Contrôle et de Certification

¹⁷ Groupement National Interprofessionnel des Semences et Plants

- l'organisation interne de la collecte et du stockage : implantation des séchoirs et silos de stockage sur le bassin de collecte, plan logistique, description des différentes opérations de collecte, gestion du transport, etc.
- la politique relationnelle avec les agriculteurs : profil des agriculteurs sur la bassin de collecte, modalités d'attribution des productions spéciales, contrats, activités d'approvisionnement et de conseil technique, politique de prix d'achat, etc.

Une deuxième phase d'enquêtes (janvier 2000) dans 15 ECS a permis de valider et d'approfondir les conclusions issues des premières enquêtes en élargissant le champ des observations.

Les filières de produits standards ont aussi été enquêtées afin d'évaluer les possibilités de filières "non OGM" de grande taille :

- Le maïs standard ; sa destination finale n'est pas précisée lors de la collecte et de la mise en silos. Ce peut être l'export, l'alimentation animale ou l'amidonnerie. C'est à la base un maïs sain, loyal et marchand : humidité maximale de 15%, 4% maximum de grains cassés, 4% maximum d'impuretés, absence d'insectes ou de parasite vivant. Il n'y a pas d'exigence variétale particulière.
- Le maïs à destination de l'amidonnerie ou de la semoulerie : la qualité de l'amidon et sa faculté de séparation des protéines, validées par Promatest, doivent être préservée par un séchage basse température (80-90°C pour l'amidonnerie, 110°C pour la semoulerie). La semoulerie recherche des variétés de maïs corné-denté, l'amidonnerie des variétés de maïs denté ou corné-denté. Récemment, ces marchés ont exigé des garanties en matière d'absence d'OGM dans les lots (présence d'OGM inférieure à la limite de perception des méthodes d'analyse PCR¹⁸ soit 0.01%).
- Le soja standard est le plus souvent destiné à l'extrusion ou à l'alimentation animale. Le soja est généralement présent sur le bassin de collecte pour des raisons agronomiques : isolement de parcelles de production de semences, limitation des tassements en monoculture de maïs.

Au cours de cette phase, l'étude a été élargie à d'autres régions de production que Aquitaine - Midi-Pyrénées afin de tenir compte de leur spécificité dans l'analyse de la faisabilité de filières "non OGM" sur le territoire français. La variabilité régionale des fonctionnements d'isolement a été abordée à travers deux régions :

- l'Alsace dont la production agricole est très tournée vers le maïs (environ 70% des terres cultivées), principalement vendu aux amidonniers, très demandeurs de "non OGM",
- le Bassin Parisien ; la production de maïs est plus limitée (10% de la production française de maïs, la sole de maïs représente environ 7% des terres cultivées). Il s'agit, pour le moment, essentiellement de maïs standard mais les entreprises de la région ont une expérience de segmentation de lots en matière de blé.

Les entretiens se sont concentrés sur l'utilisation des infrastructures de collecte, les relations avec les agriculteurs et les contrôles. La deuxième phase d'enquêtes a en outre permis de confronter les hypothèses issues de la phase précédente aux spécificités des OGM et de recueillir les propositions de gestion de l'isolement de lots "non OGM" émises par certains opérateurs entre juin 99 et janvier 2000 suite à l'évolution rapide du contexte OGM évoqué en introduction.

¹⁸ Polymerase Chain Reaction

Tableau III1

	Maïs standard 9 cas	Maïs amidonnerie ou semoulerie 4 cas	Waxy 10 cas	Maïs semences 1 cas	Maïs gavage 3 cas	Maïs riche en huile 2 cas	Total 29 cas (en %)	Soja standard 2 cas	Soja spécifique 5 cas	Total 7 cas (en %)
FOURCHETTE DE VOLUME DE LA FILIERE	5000- 120000T	3000- 400000T	500-20000T	13500T	2000-8000T	300-1000		1000-4500T	200-4000T	

TRANSFORMATION DANS L'ESPACE										
Modalités physiques										
<i>Transport</i>										
Flotte propre (a) ou Sous-traitance (b)	1NC (a)3 (b)5	1NC (a)1 (b)2	(b)10	(b)1	(a)2 (b)1	(b)2	(a)22% (b)78%	(a)1 (b)1	(a)1 (b)4	(a)29% (b)71%
<i>Préstockage</i>										
Même site que traitement (b) ou non (a)	(a)6 (b)3	(a)4	(a)7 (b)3	(b)1	(a)2 (b)1	(b)2	(a)65% (b)35%	(b)2	(a)2 (b)3	(a)29% (b)71%
<i>Stockage</i>										
Site dédié à la filière (b) ou non (a)	-	(a)3 (b)1	(a)6 (b)4	(b)1	(a)1 (b)2	(a)2	(a)60% (b)40%	(a)1 (b)1	(a)4 (b)1	(a)71% (b)29%
Modalités de coordination										
<i>Caractéristiques spatiales du bassin</i>										
Nbre d'agriculteurs : 10 (a) ; 50-100 (b) ; >100(c)	(b)1 (c)8	(c)4	(a)1 (b)3 (c)3 3NC	(c)1	(a)1 (b)1 (c)1	(a)2	(a)15% (b)20% (c)65%	2NC	(b)4 1NC	
Taille du secteur <50km (a) ; 50-100 (b) ; >100(c)	(a)6 (b)3	(a)1 (b)1 (c)2	(a)2 (b)5 (c)3	(a)1	(a)1 (b)1 1NC	(a)2	(a)46% (b)36% (c)18%	(b)1 (c)1	(b)3 (c)2	(b)57% (c)43%
<i>Modalités de choix des agriculteurs</i>										
Localisation géographique (b) ou non (a)	(a)9	(a)3 (b)1	(a)4 (b)6	(b)1	(a)2 (b)1	(a)1 (b)1	(a)65% (b)35%	(a)2	(a)5	(a)100%
<i>Contenu des cahiers des charges</i>										
Fixation lieu de livraison (b) ou non (a)	(a)9	(a)3 (b)1	(a)1(b)9	(b)1	(a)1 (b)2	(b)2	(a)50% (b)50%	(a)1 (b)1	(a)2 (b)3	(a)43% (b)57%
<i>Traçabilité</i>										
De l'origine (b) ou non (a)	(a)9	(a)2 (b)2	(a)5 (b)4 1NC	(b)1	(a)2 (b)1	(a)2	(a)70% (b)30%	(a)2	(b)5	(a)30% (b)700%

TRANSFORMATION PHYSIQUE										
Modalités physiques										
<i>Séchage</i>										
Séchage de tous produits en fonction des arrivées	9	3	0	0	0	0	41%			
Séchoir dédié pendant 1 laps de temps à une filière	0	1	6	1	2	2	41%			
Séchoir dédié à la production d'une filière particulière	0	0	4	0	1	0	18%			

NC : Non Connu

Lors du choix de l'interlocuteur dans les ECS enquêtées, on a plutôt privilégié le responsable "qualité des matières premières" ou "produits spéciaux" plutôt que le service "semences" généralement séparé. Cette filière est donc très peu représentée dans l'échantillon car les mécanismes de fonctionnement de la production et de la collecte des semences nous ont paru déjà précisément définis par les règlements techniques de la production, du contrôle et de la certification des semences et les mécanismes d'isolement semencier, étudiés par ailleurs¹⁹, nous ont paru difficilement généralisables à la mise en place de filières "non OGM" (sauf éventuellement à des filières de taille confidentielle).

De même, le nombre d'observations concernant le soja est assez limité : en effet, seules des entreprises du Sud-Ouest sont concernées et les interlocuteurs ont la plupart du temps peu de données précises à ce sujet (sauf en "soja de pays").

III Résultats

Après avoir présenté la diversité des systèmes de production de lots enquêtés, on montre l'effet de différentes structurations de l'appareil de collecte sur les risques de contamination entre lots puis la diversité des dispositifs de maîtrise de ces risques.

1- Diversité des systèmes de production de lots dans les ECS

Un premier constat est que l'échantillon observé offre bien une grande diversité de fonctionnement des processus de collecte-stockage. Pour un même débouché il y a plusieurs modèles de fonctionnement. Dans le tableau III2 l'ensemble des filières de collecte-stockage des 23 entreprises enquêtées est présenté. Les 36 situations (certaines entreprises ont plusieurs types de maïs ou de soja) sont ventilées par grand type de débouché et décrites en s'appuyant sur le schéma simplifié du processus de transformation des récoltes parcellaires en lots commercialisables présenté plus haut (Schéma III1). A chaque phase de transformation (spatiale, physique et dans le temps) sont associées les variables de structure et d'action qui la caractérisent : modalités physiques (structures des équipements et des bassins de collecte) et modalités de coordination (flux d'information, spécifications, contrôles) entre les entreprises et les agriculteurs.

Dans le tableau III2, la fonction de transformation spatiale est soutenue, en terme de modalités physiques, par les structures de transport des récoltes et les transferts entre silos ainsi que par l'organisation des différents types des silos dans le bassin de collecte. On évalue l'ampleur de celui-ci par deux indicateurs : le nombre d'agriculteurs concernés par le produit et l'aire sur laquelle s'effectue la collecte. Les modalités de coordination qui jouent sur cette phase concernent les niveaux d'exigence en matière de localisation des parcelles et de fixation des lieux de livraison. Enfin la traçabilité de l'origine est entendue ici comme l'ensemble des modalités qui permettent de saisir et de conserver tout au long du processus de fabrication d'un lot, les informations concernant l'identification des parcelles dont les récoltes composent ce lot.

¹⁹ et présentés par le GNIS dans plusieurs groupes de travail du projet

Tableau III2 suite	Maïs standard	Maïs amid/semoule	Waxy	Maïs semences	Maïs gavage	Maïs riche en huile	Total 29 cas (en %)	Soja standard	Soja spécifique	Total 7 cas (en %)
TRANSFORMATION PHYSIQUE (SUITE)										
Modalités de coordination										
Caractéristiques physiques du bassin ²⁰ Hétérogénéité de milieu faible (a) ; forte (b)	(a)1 (b)4 4 NC	(a)3 (b)1	(a)1 (b)2 7NC	(b)1	2 NC (b)1	NC	(a)30% (b)55%	2NC	5NC	
Modalités de choix des agriculteurs Performance technique (b) ou non (a)	(a)9	(a)4	(a)7 (b)3	(b)1	(a)3	(b)2	(a)80% (b)20%	(a)2	(a)5	(a)100%
Contenu des cahiers des charges de base										
Pureté variétale (b) ou non (a)	(a)9	(a)4	(b)10	(b)1	(a)2 (b)1	(b)2	(a)50% (b)50%	(a)2	(a)5	(a)100%
Semences imposées (b) ou non (a)	(a)9	(a)3 (b)1	(a)2 (b)8	(b)1	(b)2 (b)1	(b)2	(a)55% (b)45%	(a)2	(b)5	(a)30% (b)70%
Isolement/détournage (b) ou non (a)	(a)9	(a)4	(a)4 (b)6	(b)1	(a)	(a)1 (b)1	(a)72% (b)28%	(a)2	(a)5	(a)100%
Nettoyage du matériel (b) ou non (a)	(a)9	(a)4	(a)5 (b)5	(b)1	(a)3	(a)2	(a)80% (b)20%	(a)2	(a)4 (b)1	(a)80% (b)20%
Recommandation sur l'ITK (b) ou non (a)	(a)9	(a)4	(a)8 (b)2	(b)1	(a)3	(a)2	(a)90% (b)10%	(a)2	(a)1(b)4	(a)40% (b)60%
Spécification "non OGM" (inexistantes en 99 sf soja)										
Attestation signée par l'agriculteur (b) ou non (a)	(a)5 (b)4	(a)3 (b)1	(a)7 (b)3	(a)1	(a)3	(a)2	(a)72% (b)28%	(a)2	(a)5	(a)100%
Attestation signée du semencier (b) ou non (a)	(a)5 (b)4	(a)2 (b)2	(a)8 (b)2	(a)1	(a)2 (b)1	(a)2	(a)70% (b)30%	(a)2	(a)3 (b)2	(a)60% (b)40%
Production propre de semences (b) ou non (a)	(a)9	(a)2 (b)2	(a)9 (b)1	(b)1	(a)2 (b)1	(a)2	(a)80% (b)20%	(b)2	(a)2 (b)3	(a)40% (b)60%
Contrôle produit²¹										
Semences : PCR (c) /autre (b)/non (a)	(a)9	(a)3 (c)1	(a)10	(b)1	(a)3	(a)2	(a)94% (b)3% (c)3%	(a)2	(a)3 (c)2	(a)80% (c)20%
Champ : PCR (c) /autre (b)/non (a)	(a)9	(a)3 (c)1	(a)3 (b)7	(b)1	(a)3	(a)2	(a)69% (b)28% (c)3%	(a)2	(a)2 (b)3	(a)40% (b)60%
Livraison : PCR (c) /autre (b)/non (a)	(b)8 (c)1	(b)3 (c)1	(b)10	(b)1	(b)3	(b)2	(b)93% (c)7%	(b)2	(b)4 (c)1	(b)100%
Stockage : PCR (c) /autre (b)/non (a)	(a)4 (b)4 (c)1	(a)1 (c)3	(a)1 (b)7 (c)2	(b)1	(b)3	(b)2	(a)20% (b)35% (c)45%	(a)1 (c)1	(a)2 (b)1 (c)2	(a)43 (b)14 (c)43
Traçabilité des process (b) ou non (a)										
(a)7 (b)2	(a)1 (b)2	(a)5 (b)5	(b)1	(a)2 (b)2	(a)2	(a)2	(a)60% (b)40%	(a)1 (b)1	(b)5	(a)14% (b)86%
TRANSFORMATION DANS LE TEMPS										
Modalités physiques										
Stockage										
Volume unitaire : faible et nombreux (a) ; fort et concentré (b)	(a)4 (b)5	(b)4	(a)2 (b)5 3NC	(b)1	(a)2 (b)1	(a)2	(a)39% (b)61%	(b)1 INC	(a)2 (b)3	(a)30% (b)60%
Modalités de coordination										
Modalités de choix des agriculteurs										
Recours à des agri sécheurs-stockeurs (b) ou non (a)	(a)8 (b)1	(a)4	(a)9 (b)1	(a)1	(a)2 (b)1	(a)2	(a)90% (b)10%	(a)2	(a)2 (b)3	(a)57% (b)43%
Contenu des cahiers des charges										
Fixation date de livraison (b) ou non (a)	(a)9	(a)3 (b)1	(a)4 (b)6	(b)1	(a)2 (b)1	(b)2	(a)62% (b)38%	(a)2	(a)5	(a) 100%
NATURE DE LA TRANSACTION AVEC LES AGRICULTEURS										
Marchande	5	3	0	0	0	0	27%	2	0	30%
Domestique	4	0	0	0	2	0	21%	0	0	0%
Contractuelle	0	1	10	1	1	2	52%	0	5	70%

²⁰ Inconnues dans les enquêtes 99

²¹ (a) aucun contrôle, (c) au moins une PCR réalisée, (b) autre

En matière de transport, la sous-traitance est généralisée. Seules quatre entreprises sur 23 n'utilisent que leur propre flotte de camions (plutôt les petites structures). Même pour des produits imposant des seuils de pureté assez stricts (maïs Waxy, semences) il n'y a pas de problèmes de contamination attribuables au transport, ***aux seuils habituels auxquels se réfèrent les personnes enquêtées (1 à 4%)***. Les bennes peuvent en effet être dédiées pour la saison à un produit ou bien l'ECS vérifie aléatoirement que les nettoyages du matériel sont effectués. En tout état de cause la sous-traitance du transport lui permet de déléguer par contrat la responsabilité d'une éventuelle pollution pendant cette phase. ***Au seuil de 1% et inférieur il y a donc probablement des mesures plus précises à faire sur les contaminations au cours des transports et ruptures de charges et une vigilance à porter sur le contenu des cahiers des charges des transporteurs.***

En matière d'organisation spatiale des silos, on a cherché à savoir si la récolte subit plusieurs transferts avant le stockage final et si ce dernier site est plus ou moins dédié à une filière donnée. Les situations étudiées montrent une prédominance des cycles longs en maïs et des cycles courts en soja. Une stratégie d'affectation de site dédié à un produit peut se mettre en place mais il n'y en a pas pour des volumes de moins de 3 ou 4000 tonnes.

La traçabilité de l'origine est absente dans deux cas extrêmes : soit dans les maïs et soja standard, gros volumes dont les destinations finales sont décidées en fonction des cours, soit pour des maïs spécifiques soumis à contrat de production avec peu d'agriculteurs. Dans ce dernier cas, l'information ne suit pas formellement le lot mais on sait qu'on pourrait la retrouver en ressortant les contrats. Cette traçabilité existe par contre, avec une formalisation plus ou moins poussée, dès que les clients la réclame, c'est à dire, dans quelques très rares cas avant 2000 (un maïs waxy et un soja) et depuis le début 2000 dans les cas où des assurances particulières sont réclamées par les clients en matière d'OGM (maïs amidonnerie, maïs waxy, soja de pays et soja à destination d'alimentation humaine (Nutrition et Soja)).

La fonction de transformation physique concerne toutes les manipulations et changements d'état physique appliqués au flux de produit. Les différentes techniques de conservation (ventilation, désinsectisation) n'ont pas été abordées car elles n'interviennent pas dans les problématiques d'isolement. L'effet du transilage sur la pollution des lots n'a pu être intégré car il n'y a pas de données permettant d'évaluer précisément la pollution résultant des différents processus de manutention : volumes morts dans les pieds d'élévateurs et les fonds de silos, grains coincés dans les différentes chaînes de manutention. En outre, en ce qui concerne le maïs, au niveau de pureté généralement admis jusqu'ici, les effets du transilage sur la pureté des lots seraient négligeables d'après les personnes enquêtées, par rapport aux effets du séchage. Pour celui-ci en effet, après passage d'un lot dans un séchoir, il peut rester jusqu'à 2 à 3% de grains qui vont se mêler au lot suivant (Source ITCF). Or, on le voit sur les modalités de séchage (tableau III1), peu de séchoirs sont dédiés à une filière (20%). ***Il y a donc au niveau du séchoir un véritable nœud stratégique dans les procédures de séparation entre filières.***

Les modalités de coordination qui soutiennent cette phase de transformation physique concernent des spécifications tenant aux critères de choix des agriculteurs par les ECS et aux cahiers des charges qu'ils négocient avec eux. Le choix des agriculteurs sur des bases techniques est rarement formalisé mais la connaissance des compétences techniques des exploitants les plus proches de l'ECS (convention domestique) peut influencer l'attribution des contrats généralement transmis par les technico-commerciaux. Les spécifications sur les produits et sur les pratiques de production, quand elles existent, sont très axées sur les questions de semence et de variété. Même pour des filières qui visent explicitement une

richesse en un composant donné (amylopectine ou acides gras) c'est la pureté variétale qui sert d'indicateur au tri et au règlement de la transaction avec l'agriculteur. Plus rarement, les itinéraires techniques et les pratiques de détournement font l'objet d'une entente. De ce point de vue les filières semences, maïs waxy et soja alimentaire sont les plus exigeantes.

Les engagements spécifiques concernant les filières « garanties sans OGM » se généralisent sous forme d'attestations signées par les agriculteurs signalant qu'ils n'ont pas utilisé de semences OGM. Les analyses PCR se cantonnent au stade du stockage plus rarement à la livraison ou au champ (1 cas en amidonnerie à la demande expresse d'un client).

La traçabilité de process est entendue ici comme l'ensemble des modalités permettant de remonter à la phase du process d'assemblage où une erreur a pu se produire. Lorsque nous notons que cette traçabilité existe, elle s'applique rarement à une remontée jusqu'au process de production agricole (on a vu que le relevé d'itinéraires techniques est rare). Par contre, pour le maïs, c'est le process de séchage qui est classiquement "tracé" en relation avec son impact sur la qualité finale du produit. Les conditions de séchage (température, humidité, temps de séchage) sont relevées et conservées au moins pour les lots à destination de l'amidonnerie (les excès de température au moment du séchage dégradent en effet les capacités d'extraction de l'amidon). Il reste que pour beaucoup de systèmes décrits, dès lors qu'ils intéressent de gros volumes avec des phases d'assemblage successifs au cours desquelles les grains se mélangent et les informations les concernant se perdent, cette traçabilité est loin de la définition classique qu'en donne la normalisation. Celle-ci en effet suppose non seulement de pouvoir remonter à la source d'une non-conformité via le système documentaire et les analyses mais aussi de pouvoir rappeler les "déviants" si l'on détecte une erreur dans le process (Ruffieux, Valceschini et al. 1998).

La fonction de transformation dans le temps qui couvre le stockage proprement dit est décrite en matière de variables de structure par deux grandeurs : une évaluation du rapport entre capacités de stockage et collecte ; une évaluation qualitative de la capacité de classement à travers la distinction entre des situations où des volumes unitaires "isolables" sont nombreux et des situations dotées historiquement de capacités importantes et peu propices à la segmentation.

Les modalités de coordination consistent à avoir recours aux capacités de stockage des agriculteurs qui constituent un facteur de flexibilité à double tranchant car, si elles améliorent les capacités de segmentation des récoltes en différant les livraisons, ces capacités de stockage comportent deux risques pour l'ECS : un comportement "opportuniste" des agriculteurs cherchant à valoriser au mieux ce service en vendant en fin de compte leur récolte à la concurrence ; une incertitude sur la qualité du stockage dans certaines régions. Le recours aux capacités de stockage des agriculteurs apparaît du coup aujourd'hui assez rare sauf dans quelques cas de contractualisation étroite (soja alimentaire) ou en cas de saturation manifeste des capacités de stockage de l'entreprise (une entreprise dont le développement commercial rapide a augmenté brutalement les volumes vendus). Autrement, les ECS préfèrent jouer sur un stockage de très court terme, voire "sur pied" via une fixation des dates de livraison dans les transactions. Cette possibilité est soutenue, là encore, par le facteur variétal en jouant sur les différences de précocité entre filières (les variétés waxy par exemple sont plus tardives que les autres). ***Le stockage chez les agriculteurs paraît donc un point stratégique dans la gestion des lots dont l'usage est délicat. Il est associé à la question du séchage, autre point névralgique du système, en cribs ou en grain. Celui-ci est possible dans les régions du sud mais peu envisageable en Bassin parisien ou en Alsace.***

La dernière ligne du tableau illustre les différents modes de transaction rencontrés entre agriculteurs et ECS. La forme marchande est essentiellement fondée sur les prix et concerne plus fréquemment les filières standards (maïs et soja) et l'amidonnerie. Un second mode d'échange peut être fondé sur un contrat de production explicite établi avant implantation de la culture ou peu de temps après et stipulant un certain nombre d'engagements en matière d'objectifs et de moyens de production et d'échange des produits. Le dernier mode de transaction rencontré, dit domestique, si il n'est pas formalisé n'en comporte pas moins des engagements forgés par l'habitude et l'expérience. Ces deux dernières formes de transaction sont plus systématiquement employées dans des filières spécifiques voire de niche.

Les différentes phases de transformation décrites dans ce Tableau III2, avec leurs modalités physiques et leurs modalités de transaction entre acteurs, ne sont pas indépendantes entre elles ni indépendantes de l'organisation générale de l'entreprise. A titre d'exemple, les ECS X et Y ont toutes deux une filière maïs Waxy dans la même région géographique avec les mêmes demandes de la part de leurs clients (96% de pureté variétale). Néanmoins l'organisation de la collecte est différente. Dans le cas de X, les agriculteurs livrent le Waxy dans un centre de préstockage où il est isolé physiquement du maïs standard. Puis le Waxy est transféré à un site de séchage où l'un des séchoirs lui est dédié. L'entreprise Y n'a quant à elle qu'un seul séchoir performant ; il y a regroupement de la collecte et du séchage du Waxy sur la fin de la collecte du maïs (en jouant pour une part sur la tardivité naturelle du Waxy par rapport au standard). Un contrat de production lie la coopérative X et l'agriculteur : en contrepartie d'une prime, celui-ci s'engage à acheter les semences de la variété imposée à l'ECS, à nettoyer son matériel de semis et de récolte avant utilisation et à fournir une marchandise de pureté supérieure à 96%. En ce qui concerne l'ECS Y, le contrat est analogue mais impose à l'agriculteur de livrer son maïs à convenance de l'ECS directement au séchoir. La relation contractuelle est chez X doublée d'une composante domestique : ainsi le détournage est systématiquement pratiqué quoique non contractualisé ce qui permet de ne pratiquer de tests colorimétriques de pureté qu'à livraison. Par contre, Y pratique des contrôles en champ pour décider de la nécessité d'un détournage. Les relations entre Y, un négoce, et ses livreurs sont en effet plus volatiles²² et l'hétérogénéité physique du bassin de collecte, plus importante que pour X, entraîne une plus grande variabilité de la qualité des livraisons.

Cette diversité des moyens mis en œuvre pour séparer des lots dans les filières maïs et soja met en évidence deux faits essentiels pour le raisonnement d'une maîtrise des isolements qui vont être développés dans les deux chapitres suivants :

- Certaines combinaisons de variables de structure des appareils de collecte sont plus risquées que d'autres, a priori, vis à vis de la possibilité d'isoler des lots
- Une partie des risques inhérents à ces structures de la collecte est maîtrisée par des procédures de planification et de pilotage des flux qui font intervenir la forme et le contenu des contrats passés avec les agriculteurs et des dispositifs de contrôle, a priori, des moyens. Ces deux variables jouent en partie sur des facteurs agronomiques

²² Caractéristique non généralisable à l'ensemble des négoce.

Tableau I2 Différents groupes d'infrastructures de stockage

Nombre de transferts entre l'agriculteur et l'industriel	Spécialisation des outils de collecte stockage / filières de débouchés		
	Système peu spécialisé	Système intermédiaire	Système dédié
3 transferts	<p>GROUPE 1 5 Maïs standard 3 maïs amidon/brasserie</p>	<p>GROUPE 2 5 maïs waxy 3 soja spécifique 1 maïs gavage</p>	<p>GROUPE 3 2 maïs Waxy</p>
2 transferts	<p>(non rencontrés : petits négociants)</p>	<p>GROUPE 4 3 maïs standard (négociants) 2 soja standard 1 maïs waxy 2 soja spécifique 1 maïs semence 1 maïs riche en huile</p>	<p>GROUPE 5 1 Maïs waxy 1 Maïs gavage</p>
1 transfert	<p>GROUPE 6 1 maïs waxy 1 maïs gavage 1 maïs riche en huile</p>		

2- Des risques de contamination a priori différents selon l'infrastructure de collecte – stockage et des variables de pilotage mises en œuvre pour maîtriser ces risques.

L'observation des modalités physiques de la collecte et du stockage décrites dans le chapitre précédent, permet d'identifier deux variables clés jouant sur la diversité des risques de contamination des lots.

La première est le nombre de transferts (Schéma I1) que subit le lot entre la sortie du champ et la vente (mélangé aux autres récoltes parcellaires) au client de l'ECS. A chaque transfert, les risques liés au transport (propreté des bennes, couverture pendant le transport...), au transilage (grains restants dans les élévateurs, les silos, les chaînes de manutention) et aux stockages intermédiaires se multiplient. Pour des filières de haute valeur ajoutée ces risques sont compensés par un redoublement de précaution en matière de nettoyage mais ce n'est pas le cas général. Pour cette variable nous avons distingué trois modalités : (i) l'apport direct dans le silo du client ; (ii) l'apport direct dans le site de regroupement-séchage où se fera le stockage final avant vente au client ; (iii) le passage par des points de collecte intermédiaires avant le site de séchage-stockage.

La seconde variable est le degré de spécialisation des équipements affectés à l'allotement (Schéma I2). Le séchoir y constitue un point de convergence des flux et par là même un point sensible en matière de risque de contamination. Nous avons distingué trois niveaux de spécialisation : (i) un niveau de spécialisation forte où l'ensemble des modalités de transport, transilage, séchage et stockage sont dédiées à un seul produit, ce qui limite les risques de croisement de flux ; (ii) à l'inverse, le niveau le plus faible correspond à un site de regroupement où plusieurs produits convergent et sont traités avec les mêmes outils ; (iii) un niveau intermédiaire, dans lequel tout en convergeant vers le même site les flux peuvent être traités par deux chaînes plus ou moins isolées en fonction des aléas de l'année.

A l'intersection de ces deux variables nous avons pu classer les situations enquêtées dans six types d'infrastructures auxquelles sont attachées des risques différents, a priori croissants entre le type 6 et le type 1 (Tableau I2, rappel ci-contre).

Les entreprises de collecte stockage mettent alors en place des procédures de planification et de pilotage pour réduire ces risques. Ces procédures peuvent être décrites à travers trois variables interdépendantes sur lesquelles les ECS jouent pour réduire les contaminations des lots :

- l'organisation logistique de la collecte : modes d'utilisation des équipements de préstockage et de séchage, dans le temps et dans l'espace,
- les modes de relations entre l'ECS et les agriculteurs : contrats plus ou moins détaillés (instructions de livraison, itinéraire technique, achat de semences certifiées,...), conseil technique, établissement de relations « domestiques » avec les agriculteurs,
- les outils de contrôle des moyens de production (analyses au champ, à livraison, contrôle documentaire ...) et des résultats (analyses des lots stockés).

Le type 1 est fréquemment rencontré pour le maïs standard et l'amidonnerie soit parce que, gros collecteur de maïs, l'ECS consacre ses capacités d'isolement à des filières spécifiques (sud-ouest), ou a misé sur un stockage de très grosse capacité peu segmentée (Alsace); soit parce que, faible collecteur de maïs, l'ECS concentre le maïs en un ou deux lots (Centre, Bassin parisien).

La collecte est réalisée sur une période assez courte (3 semaines - 1 mois). Les procédures d'allotement sont réduites ; si elles existent, elles se font sur des caractéristiques qui permettent un tri rapide à livraison : maïs corné vs. denté, isolement d'une variété phare sur le bassin d'approvisionnement (volume important). Les relations avec les agriculteurs sont marchandes : elles sont essentiellement centrées sur les prix d'achat. Le technicien a avant tout une activité commerciale (vente d'intrants), le conseil est réduit. L'essentiel du dispositif de maîtrise de la qualité des lots repose donc sur des procédures de contrôle :

- - à livraison en ce qui concerne des critères simples, bases du paiement (humidité, taux d'impuretés) et de l'allotement,
- sur cellule de stockage, afin d'avoir les caractéristiques moyennes du lot.

Sur les huit cas de ce type, trois sont concernés par des spécifications non OGM au moment de l'enquête (absence de traces soit moins de 0,01%). Le pilotage de la collecte s'effectue globalement de la manière décrite ci-dessus mais s'y ajoutent des analyses PCR de détection des OGM ; celles-ci ont lieu sur maïs de cellule de stockage mais pas à livraison car les délais d'analyse (48h à l'heure actuelle) sont incompatibles avec les exigences de célérité de la période de collecte. Il s'agit donc de procédures de contrôle a posteriori : On constate le résultat, on ne le maîtrise pas.

Le type 2 réunit la moitié des filières waxy rencontrées et le soja spécifique. Dans ce cas, les volumes sont trop faibles en valeur absolue (inférieurs à 3000 T) ou relative (moins de 2% du maïs collecté) pour qu'il leur soit consacré un site dédié. Si deux séchoirs sont présents sur le site, on essaiera d'en consacrer un entièrement au maïs waxy, production qui fait l'objet d'un contrat de base établissant les modalités d'achat des semences, le seuil de pureté et la possibilité de venir faire des contrôles au champ. Mais une partie de ces contrats ont un caractère promotionnel et s'inscrivent dans une politique concurrentielle pour la collecte. Un certain nombre d'obligations peuvent alors être « relâchées » pour ne pas perdre des volumes. Il y a dans ce cas en particulier perte de traçabilité et irrégularités des livraisons. Dans ce cas, le séchoir destiné au waxy peut être ponctuellement sous-utilisé et il est tentant d'y décharger les surplus de l'autre séchoir consacré au maïs banalisé présent sous de très gros volumes.

Pour réguler ces flux, certains ECS complètent alors le contrat précédent soit en incitant les agriculteurs à livrer dans certains points de collecte consacrés au waxy, soit en affectant un moment de la semaine (le week-end par exemple) à cette livraison. Dans le premier cas, le stockage intermédiaire permet en partie de réguler l'utilisation journalière du séchoir. Dans le second cas, il suppose de bloquer l'utilisation du séchoir pour le waxy sur un ou deux jours (avec des risques de saturation).

A partir du type 2, si l'on réduit le nombre de transferts par une livraison directe au site de regroupement-séchage on a le type 4 qui réunit les maïs standard de négociants (ils ont généralement moins de points de collecte intermédiaires que les coopératives) et des filières spécifiques, maïs ou soja. Dans quelques cas, l'existence de relations de long terme entre agriculteurs et ECS débouchent sur des transactions qui ne sont plus uniquement fondées sur le prix comme précédemment, mais sur la confiance et la régularité des transactions : l'ECS est l'acheteur de toute la récolte et fournit également les intrants de l'exploitation ce qui lui donne des informations sur ce qui est semé et sur les itinéraires techniques pratiqués. Plus généralement, dans la plupart des ECS de ce type, c'est un contrat qui joue encore un rôle de régulation, soit en imposant la livraison directe au site de séchage à la demande, soit en organisant un ramassage en bout de champ selon un calendrier négocié avec l'agriculteur. Ces modalités renvoient la charge de régulation des flux vers les agriculteurs via le stockage sur pieds ou dans leurs silos, soit, pour les filières de gros volumes (maïs waxy), en étalant les

livraisons pour réguler l'usage du séchoir, soit, au contraire, pour les petits volumes (maïs riche en huile), en concentrant les apports sur un temps court, par le choix et la contractualisation d'un créneau variétal particulier.

Pour le soja, l'isolement repose sur la mise en place d'un contrat doté d'un cahier des charges correspondant aux spécifications de modes de production demandées par l'aval. Dans les cinq cas observés, ce contrat impose l'achat de semences certifiées qui garantissent l'absence (<1%) d'impuretés variétales. L'autogamie du soja permet d'éviter que des isolements soient nécessaires. Les contrôles sont essentiellement de type documentaire (étiquettes des lots de semences notamment, enregistrement de l'itinéraire cultural).

A l'extrême, dans le type 6, le flux ne transite plus par l'ECS mais est livré directement au client dans des cas de microfilières.

Les types 3 et 5 qui ne diffèrent que par le nombre de transferts, offrent l'opportunité d'un isolement total du site de regroupement. Ils correspondent à des situations (essentiellement en maïs waxy) où les volumes traités sont assez importants (plus de 4000 T) et compatibles avec les capacités d'un séchoir (fut-il un peu ancien) isolé sur un site, où il est alors possible de consacrer toute une chaîne d'équipement à un seul produit.

Ils sont fondés sur des processus de collecte très planifiés qui s'inspirent de ce qui se fait en production de semences. La production fait l'objet d'un contrat entre agriculteurs et ECS. L'agriculteur s'engage à acheter les semences de variétés déterminées à l'ECS. Pour le waxy, le contrat peut mettre en place des distances d'isolement par rapport aux parcelles de maïs consommation (en général 100 m) afin de limiter des problèmes de contamination pollinique. L'organisation de la logistique est très planifiée : par contrat, l'ECS fixe le lieu et la date de livraison ce qui permet d'optimiser l'utilisation des infrastructures et du site dédié au produit spécial ; dans un cas, l'ECS s'autorise à faire arrêter les chantiers de récolte à sa convenance afin d'écarter les pics de récolte. En outre, dans le cas de bassins d'approvisionnement de grande taille, afin de limiter les transports de la marchandise vers le site de traitement dédié, l'ECS peut réserver ces contrats aux exploitations agricoles les plus proches du site. En ce qui concerne les contrôles, en waxy, le processus de collecte comprend des analyses colorimétriques (à base d'iode) en champ avant récolte ce qui permet à l'ECS d'avoir une idée de la qualité de la future livraison et de décider d'un éventuel détournement.

L'analyse des différentes procédures d'isolement des lots de maïs ou de soja actuelles permet de projeter différentes logiques possibles de segmentation de lots « non OGM » (Partie 1).

Conclusion générale du programme 3

La première partie de ce rapport du programme 3 présente différentes conclusions sur la faisabilité de la ségrégation de filières « non OGM », au champ et à la collecte. Ces conclusions se réfèrent à un contexte cultural qui n'existe pas actuellement en Europe, celui où des variétés OGM seraient cultivées sur des surfaces importantes.

Les projections que nous avons réalisées ont été rendues possibles par un travail important, présenté dans les 2^{ème} et 3^{ème} parties de ce rapport, analyse et modélisation de la dissémination des gènes d'une part, de l'organisation des stratégies des acteurs d'autre part. L'ancrage de ces analyses sur la réalité agricole et notre volonté de transparence sur les bases de l'expertise réalisée sont les seules garanties que nous pouvons donner aux utilisateurs de nos résultats.

Cette étude a nécessité la mise au point de méthodologies d'analyse et de modèles qui pourront, à l'avenir, être utilisés pour d'autres problèmes de ségrégation de filières ; ses retombées potentielles dépassent donc le cadre de l'isolement de filières « non OGM », ou même de filières « OGM ».

Cependant, dans le cas particulier des OGM, des difficultés spécifiques sont apparues, liées essentiellement aux seuils très bas de présence fortuite (10^{-3} ou 10^{-4}) qui sont demandés par l'aval des filières. Au niveau de modèle de flux de gènes, la fiabilité des conclusions est aujourd'hui bien meilleure pour les seuils de 5% et 1% que pour les seuils plus bas ; en tout état de cause, les résultats de nos simulations sont cohérents, pour les seuils de 5% et 1%, avec les données disponibles, et avec l'expertise des acteurs de terrain. Pour les seuils plus bas, on dispose de peu de données de validation, et encore moins de références. Concernant les stratégies de ségrégation, l'expertise des acteurs s'exerce sur des seuils de quelques %, voire 1% (semences). On n'a aucune référence quantifiée sur les risques de mélange fortuit liés au transport, aux machines de manutention, et très peu d'information sur les risques liés aux mélanges dans les séchoirs. Les recommandations faites devront donc être affinées par des méthodes spécifiques, approfondies et coûteuses, si l'on s'oriente vers des seuils de 0.1 ou 0.01%.

De fait, l'utilisation des résultats de la recherche (le modèle de flux de gènes ou les stratégies de ségrégation) pour proposer des modalités d'organisation de la production et de la collecte a suivi de très près la production de ces résultats. La validation du modèle est en cours, son amélioration est prévue pour pallier ses nombreuses lacunes : pas de prise en compte des obstacles à la circulation du pollen (forêts, haies...), pas de prise en compte des autres cultures que le maïs dans le parcellaire, pas de prise en compte des « coups de vent » ; le paramétrage variétal (viabilité du pollen, protandrie, quantité de pollen émise...) reste sommaire. Les ordres de grandeur qu'il délivre sont probablement corrects pour des situations moyennes, mais il reste insuffisant pour estimer la probabilité de dépasser tel ou tel seuil.

De la même façon, les stratégies de ségrégation des entreprises ont été décrites dans leurs grandes lignes. Il est clair que l'adaptation à une entreprise donnée, ou à une petite région particulière, mériterait des analyses plus précises, mettant sans doute à jour des solutions originales adaptées. Les méthodes d'investigation et de projection que nous avons mises au point pourraient être utilisées, également, pour une telle analyse au cas par cas qui reste à faire.

Remerciements

Les auteurs remercient :

Mme F. Bénétrix (AGPM), MM. R. Bonhomme (INRA), P. Cellier (INRA), A. D'Anselme (FNA) ; Mme A. Desforges (CFCA) ; MM J. Evrard (CETIOM), X. Foueillassar (AGPM), B. Fabre (GNIS), P. Girardin (INRA), D. Guérin (GEVES), R. Moliné, A. Panouillé (INRA), Niquet (ITCF) ; M. Viallet (Limagrain),

Et,

tous les responsables d'entreprises de collecte stockage qui ont bien voulu les recevoir et répondre à leurs questions.

Bibliographie

AGPM, 2000. Besoins en degrés-jours des variétés de maïs, réactualisation 2000. AGPM infos, n°266, juillet 2000, 4 p.

ALLEN R. G., SMITH M., PEREIRA L. S., PERRIER A., 1994. An Update for the Calculation of Reference Evapotranspiration. *ICID Bulletin*, 1994, vol. 43 NO 2, pp 35 - 92

BASSETTI & WESTGATE, 1993. Emergence, elongation and senescence of maize silks. *Crop Sci.*, 33 : 271-275

BASSETTI P, WESTGATE M. E., 1993. Senescence and receptivity of maize silks. *Crop Sci.*, 33 : 275-278

BASSETTI P., WESTGATE M. E., 1993. Water deficit affects receptivity of maize silks. *Crop Sci.*, 33 : 275-278

BONHOMME R., DERIEUX M., DUBURCQ J. B., RUGET F., 1984. Variations in ovule number at silking in various corn genotypes. *Maydica*, XXIX, 101-107

BOYAT A., KANAN F., PANOUILLE A., 1990. Adaptation de 4 types variétaux de maïs aux fortes densités de peuplement. In « *Physiologie et production du maïs* », Communications au colloque organisé par l'INRA, l'AGPM et l'Université de Paris-Sud. pp 335-343

BOYAT A., RAMDOYAL K., KANAN F., PANOUILLE A., 1983. Densité de peuplement et prolificité en épis. In « *La physiologie du maïs* », Communications au colloque organisé par l'INRA, le CNRS et l'AGPM, pp 199-204

CAMPBELL D. R., 1985. Pollen and gene dispersal : the influence of competition for pollination. *Evolution*, 39(2), pp 418-431

CAZENAVE F. 1999. Etude de la contamination pollinique chez le maïs. Mémoire de fin d'études de l'ENITA de Bordeaux, 53p + annexes

COLBACH N., MEYNARD J.M., CLERMONT-DAUPHIN C., CHAMPOLIVIER J., 2000. Génésys-colza un modèle des effets à moyen et à long terme des systèmes de culture sur les flux de gènes entre champs de colza et repousses dans un espace agricole *OCL*, 7 (4) juillet-août, 329-340.

CTPS, GEVES, 2000. Protocole technique d'étude VAT et règle de décision VAT maïs. Réseau National d'Expérimentation du CTPS. 22 p + annexes.

DECAU J., PUECH J., PUJOL B., 1983. Etude comparée de la floraison, de la fructification et du rendement de maïs de prolificité différente. In « *La physiologie du maïs* », Communications au colloque organisé par l'INRA, le CNRS et l'AGPM, pp 193-198

DERIEUX M., BONHOMME R., DUBURCQ J. B.; RUGET F., 1985. Variations du nombre de grains chez différents génotypes de maïs. *Agronomie*, 5, 355-359

DERIEUX M., BONHOMME R., RUGET F., DUBURCQ J. B., 1983. Influence du génotype et du milieu sur le nombre d'ovules présents à la floraison. . In « *La physiologie du maïs* », Communications au colloque organisé par l'INRA, le CNRS et l'AGPM, pp 117-122

DUPLESSIS D.P., DIJKHUIS, F. J., 1967. The influence of time lag between pollen-shedding and silking on the yield of maize. *South African Journal of Sci*, 10 , pp 667-674

DUBURCQ J. B., BONHOMME R., DERIEUX M, 1983. Durée des phases végétative et reproductrice chez le maïs. Influence du génotype et du milieu. *Agronomie*, 3 (10), 941-946

- DUMAS C., 1990. La fécondation chez le maïs. In « *Physiologie et production du maïs* », Communications au colloque organisé par l'INRA, l'AGPM et l'Université de Paris-Sud. pp 201-206
- EL-HOUT N. M., BLACKMER A. M., 1990. Changes in nitrogen concentrations of corn leaves near silking time. *Soil Sci. Plant Anal.*, 21, 169-178
- GAY J.P., 1983. Le cycle du maïs. In « *La physiologie du maïs* », Communications au colloque organisé par l'INRA, le CNRS et l'AGPM, pp 1-11
- GIRARDIN P., 1990. De l'ovule au grain de maïs mature. In « *Physiologie et production du maïs* », Communications au colloque organisé par l'INRA, l'AGPM et l'Université de Paris-Sud. pp 187-200
- GIRARDIN P., 1999. *Ecophysiologie du maïs*, INRA Editeur, 323 pages
- GIRARDIN P., TOLLENAAR M., DELTOUR A., MULDOON J., 1987. Temporary N starvation in maize (*ZEA mays* L.) : effects on development, dry matter accumulation and grain yield. *Agronomie*, 7, 289-296
- HALL A. J., LEMCOFF J. H., TRAPANI N., 1981. Water stress before and during flowering in maize and its effects on yield, its components, and their determinants. *Maydica* XXVI, 19-38
- HEINTZ, W. (1994). "L'évolution des modes de gestion de la qualité du blé par les entreprises de collecte stockage." *Etud. Rech. Syst. Agraires Dév.*, 28 : 83-100.
- HERRERO M. P., JOHNSON R. R., 1980. High temperature stress and pollen viability of maize. *Crop Sci.* 20 : 796-800
- HERRERO M. P., JOHNSON R. R., 1981. Drought stress and its effects on maize reproductive systems. *Crop Sci.* 21 : 105-110
- KLEIN E., 2000. Estimation de la fonction de dispersion du pollen. Application à la dissémination de transgènes dans l'environnement. Thèse de l'Université de Paris XI – Orsay, 80 p + annexes.
- LE BAIL, M. (1997). Maîtrise de la qualité des céréales à l'échelle du bassin d'approvisionnement d'une entreprise de collecte-stockage. Approche agronomique. Paris, INA P-G: 249 pages.
- LONNQUIST J. H., JUGENHEIMER R. N., 1943. Factors affecting the success of pollination in corn. *Journ. Americ. Soc. Agron*, 38, pp 923-934
- MOULIAS, J. (1986). "L'O.N.I.C. : 50 ans d'expérience d'organisation du marché des céréales." *C.R. Acad. Agric. Fr.* 72(1): 39-50.
- NEFUSSI, J. (1999). "Grandes cultures : vers la transformation des filières de produits en filières de services." *OCL*, 6(6): 455-457.
- NICOLAS, P. (1990). "La formation des groupes coopératifs agro-alimentaires et la situation des agriculteurs sociétaires." *Economie et Gestion agro-alimentaire*, 16 (juillet 1990): 1326.
- RUFFIEUX, B., E. VALCESCHINI, et J.L. VIRUEGA (1998). Crédibilité et valeur économique des repères de qualité : traçabilité et marques dans le secteur de la viande bovine. L'avenir à long terme du secteur de la viande bovine, Paris.
- SADRAS V. O., HALL A. J., SCHLICHTER T. M., 1985. Kernel set of the uppermost ear in maize : I. Quantification of some aspects of floral biology. *Maydica* XXX, 37-47

- SADRAS V. O., HALL A. J., SCHLICHTER T. M., 1985. Kernel set of the uppermost ear in maize : II. A simulation model of effects of water stress. *Maydica* XXX, 49-66
- SCHOPER J. B., LAMBERT P. J., VAISLAS, B. L., 1986. Maize pollen viability and ear receptivity under water and high temperature stress. *Crop Science*, 26, pp 1029-1033
- VALCESCHINI E., W. HEINTZ (1990). La gestion de l'incertitude sur la qualité des blés par les organismes collecteurs et stockeurs de céréales. Les exploitations agricoles et leur environnement. Essais sur l'espace technique et économique, J. Brossier et E. Valceschini. Paris, INRA : 5-15
- VANHOUTTE E., 1999. Etude technique sur la création d'une filière sans OGM. Mémoire de fin d'étude de l'ESA d'Angers. Dirigé par M. Le Bail. 65 p. + annexes.
- WILSON J. H., ALLISON J. C. S., 1978. Effect of plant population on ear differentiation and growth in maize. *Ann. Appl. Biol.*, 90, 127-132