Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Le Conseil fédéral

Rapport sur les coûts-bénéfices des OGM

Executive Summary

Mandat, objectifs et méthode

En adoptant l'art. 187*d* al. 1 LAgr, le Parlement a chargé le Conseil fédéral d'établir une étude sur les coûts et les bénéfices de la culture d'organismes génétiquement modifiés (OGM) dans l'agriculture suisse. L'étude doit analyser les avantages et les inconvénients des OGM pour les producteurs, les consommateurs et l'environnement. Elle doit élaborer une méthode pour ce faire et présenter les résultats dans un rapport.

L'objectif de cette étude est de comparer les avantages et les inconvénients de certains OGM susceptibles d'être pertinents pour l'agriculture suisse cultivés de manière conventionnelle. Quatre plantes cultivées importantes pour la Suisse ont été prises en considération dans sept scénarios différents, en tenant compte d'un régime de coexistence tel que prescrit dans le projet de 2013. Deux des variétés OGM sont actuellement exploitées commercialement : il s'agit du maïs résistant à la pyrale (maïs Bt) et de la betterave à sucre résistante au glyphosate. La pomme résistante à la tavelure et au feu bactérien et la pomme de terre résistante au mildiou sont en cours de développement. La méthode de comparaison développée consiste en une analyse décisionnelle multicritère qui intègre à la fois paramètres quantitatifs et qualitatifs des domaines de l'agriculture, du marché et de l'environnement. La modélisation se base sur une combinaison de données issues de publications scientifiques et d'avis d'experts des différentes parties concernées.

Le recours aux OGM pourrait favoriser une agriculture et une filière alimentaire préservant l'environnement.

Cette étude a révélé que les principaux facteurs ayant une influence sur l'environnement lors de la culture d'OGM sont la quantité de pesticides utilisée et les mesures de séparation des flux de produits. Les OGM résistants à certains pathogènes spécifiques nécessitent en théorie moins d'intrants. Par contre, les charges représentées par la séparation des flux de produits ont un effet négatif sur la durabilité économique (trajets plus longs...). La culture d'OGM aurait donc un effet positif sur les paramètres environnementaux lorsqu'elle permet de résoudre un problème phytosanitaire et qu'elle peut être intégrée dans les flux de stockage et de transformation existants.

Dans le domaine de la durabilité environnementale, trois des quatre OGM étudiés ont montré un meilleur résultat que les variétés cultivées conventionnellement. La betterave à sucre tolérante aux herbicides, la pomme de terre résistante au mildiou et une pomme résistante à la tavelure et au feu bactérien ont besoin de moins de pesticides que les variétés conventionnelles, ce qui affecte moins les ressources naturelles, diminue la pollution de l'air, du sol et des eaux, et dans certains cas limite les effets négatifs sur les organismes non cible et sur la biodiversité. On note que les avantages observés pour la durabilité environnementale sont fortement dépendants de la disponibilité et de la gestion des résistances. Le déploiement éventuel de telles technologies devra se faire conformément à des itinéraires techniques adaptés afin de garantir leur efficacité dans le temps (rotations...).

Pas de demande pour des OGM sur le marché suisse

Au niveau socio-économique, les résultats pour les OGM se sont révélés en général moins bons que pour les plantes conventionnelles. Il y a deux raisons principales à cela : en premier lieu, il faut s'attendre à de mauvaises ventes en raison de la faible acceptation des produits OGM en Suisse, ce qui se traduit par une diminution des revenus des producteurs. Deuxièmement, les mesures de coexistence et de séparation des flux de produits entraînent des surcoûts au niveau de la production et de la transformation. En raison de ces surcoûts, les produits OGM ne peuvent pas être proposés à de meilleurs prix que les produits conventionnels. La part des surcoûts engendrés par la coexistence dépendent de différents critères : variété d'OGM, type de transformation de la récolte et distance du trajet d'acheminement. Par ailleurs, certains OGM permettent aux producteurs de simplifier les itinéraires techniques (moins d'épandages), mais ces économies ne permettent pas en général de compenser les surcoûts, rendant de fait ces cultures peu ou pas compétitives.

L'avenir de la « boîte à outil » génétique

Cette étude montre que les cultures d'OGM de première génération ne sont actuellement pas viables, surtout d'un point de vue socio-économique. Cependant le développement de variétés mieux adaptées aux agrosystèmes suisses pourrait changer ce constat, avec des variétés 1) mieux adaptées aux exigences des consommateurs, 2) ménageant les ressources des agrosystèmes 3) garantissant un revenu durable aux producteurs. Dans le contexte social actuel en mutation, et aux vues des changements probables des conditions de culture induits par le changement climatique, il se pourrait qu'en Suisse aussi, l'attractivité – en d'autres termes le rapport entre les coûts et les bénéfices – des OGM pour la production agricole évolue dans le futur. De plus, l'évolution extrêmement rapide de la science nécessitera un ajustement des cadres légaux et il est difficile de prédire quel sera l'évolution de la perception des nouvelles biotechnologies, et plus généralement de leur imbrication dans l'agriculture à moyen terme. Reconsidérer le rôle que l'on pourrait faire jouer à la boîte à outils génétique dans l'agriculture suisse de demain est primordial. L'association des techniques génétiques modernes (et pas seulement la transgénèse) à des systèmes de productions à faible intrants ou biologiques pourrait permettre d'établir un régime novateur et durable d'agriculture.

Table des matières

Executive Summary **2**

Table des matières **4**

1 Introduction **5**

2 Méthode **7**
2.1 L'analyse de décision multicritère 7
2.2 Choix des critères 7
2.3 Définition des critères de durabilité 8
2.3.1 Critères socio-économiques 8
2.3.2 Critères de durabilité environnementale 13
2.4 Arborescence et règles d'agrégation 18
2.5 Comparaison de sept systèmes culturaux contenant des OGM à leur équivalent conventionnel 22
2.6 Limites de la modélisation 23

3 Résultats **24**
3.1 Maïs Bt 24
3.1.1 Introduction 24
3.1.2 Scénarios 24
3.1.3 Evaluation de la durabilité 27
3.1.4 Synthèse de l'analyse de durabilité pour le maïs Bt 38
3.2 Betterave à sucre tolérante aux herbicides (HT) 40
3.2.1 Introduction 40
3.2.2 Scénarios 40
3.2.3 Evaluation de la durabilité 43
3.2.4 Synthèse de l'analyse de durabilité de la betterave HT 52
3.3 Pomme de terre résistante au mildiou (RM) 54
3.3.1 Introduction 54
3.3.2 Scénario 54
3.3.3 Evaluation de la durabilité 55
3.3.4 Synthèse de l'analyse de la pomme de terre RM 62
3.4 Pomme *Gala* résistante à la tavelure et au feu bactérien (RTFB) 64
3.4.1 Introduction 64
3.4.2 Scénario 65
3.4.3 Evaluation de la durabilité 67
3.4.4 Synthèse de l'analyse de durabilité de la pomme RTFB 73
3.5 Etude de sensibilité du modèle 76

4 Discussion **78**
4.1 La distinction entre durabilité à court et long terme est cruciale 78
4.2 La durabilité impactée par la coexistence 79

5 Conclusions **80**

6 Remerciements **83**

7 Annexe **84**
7.1 Abréviations 84
7.2 Bibliographie 84
7.3 Index des figures 100
7.4 Index des tableaux 100

1 Introduction

En Suisse, en raison du moratoire sur le génie génétique, aucun organisme génétiquement modifié (OGM) ne peut être cultivé. Ce moratoire instauré en 2005 par le biais d'une initiative populaire a été prolongé une première fois après cinq ans jusqu'en 2013, et une seconde fois jusqu'en 2017. Conformément à l'art. 37*a* de la loi sur le génie génétique, la Confédération est chargée d'édicter d'ici à cette date les dispositions d'exécution pour la culture d'OGM. En 2013, le Conseil fédéral a mis en consultation un régime de coexistence.

Le mandat pour le projet coûts-bénéfices est issu d'une proposition du conseiller national Hans-Jörg Walter. La proposition a été présentée dans le cadre des débats sur la politique agricole (PA) 14-17. Elle demandait la prolongation du moratoire sur le génie génétique jusqu'à la fin 2017 (art. 37*a* de la loi sur le génie génétique) et l'élaboration d'une méthode pour l'évaluation des OGM résumée dans un rapport (voir encadré). La proposition a été nettement acceptée par les deux chambres.

Art. 187*d* al. 1 Loi sur l'agriculture : *Le Conseil fédéral établit d'ici au 30 juin 2016 un rapport présentant une méthode applicable à l'évaluation de l'utilité des plantes génétiquement modifiées. Cette méthode doit montrer si une plante génétiquement modifiée peut offrir des avantages pour la production, les consommateurs et l'environnement par rapport au produit agricole et aux moyens de production conventionnels. Sur la base de la méthode élaborée, le Conseil fédéral établit un bilan du rapport coût/bénéfice des plantes génétiquement modifiées existant en Suisse actuellement.*

Ce mandat requiert la mise en place d'une méthode qui permet l'évaluation des coûts et bénéfices des OGM tout en prenant en considération les besoins des consommateurs et de l'environnement. Une analyse décisionnelle multicritère (ADMC, multi-criteria decision analysis, Bohanec et al., 2008) qui permet de synthétiser à la fois paramètres quantitatifs (prix, consommation de carburants) et qualitatifs (satisfaction des consommateurs, réputations des entreprises) a été développée et adaptée à la situation des agrosystèmes suisses.

La méthode utilisée ici (MCDA) répond aux conditions suivantes :

- couvre les trois dimensions (économique, écologique et sociale) de la durabilité.
- illustre les réalités suisses le plus fidèlement possible.
- permet une évaluation basée sur des exemples de variétés génétiquement modifiées disponibles actuellement et pouvant potentiellement présenter un intérêt pour l'agriculture suisse.

Cette étude propose de se baser sur quatre variétés OGM issus de cultures clés des agrosystèmes suisses : maïs, betterave à sucre, pomme de terre et pommiers dans sept scénarios différents. Deux de ces variétés (maïs exprimant la toxine insecticide cry/Bt et betterave tolérante à un herbicide sont déjà commercialisées, alors que les deux autres variétés sont des prototypes en développement testés en Suisse (pomme de terre résistante au mildiou et pommiers résistants à la tavelure et au feu bactérien). La méthode développée ici est néanmoins applicable plus généralement à tout autre évènement nouveau que l'on voudrait intégrer dans l'agrosystème suisse.

Ce rapport se situe dans un « écosystème » d'expertise déjà bien établi. En effet le programme de recherche national (PNR) 59 a émis un certain nombre d'avis dès 2012 sur différents aspects liés à la problématique des OGM en Suisse. De façon similaire, des organismes tels que l'académie des sciences suisses (SCNAT) ainsi que l'institut de recherche sur l'agriculture biologique (FiBL) ont produit des données et publiés des avis concernant la viabilité d'un certain nombre d'OGM dans un contexte suisse (SCNAT, 2013, Speiser et al., 2013). En particulier la revue de Speiser et al. (2013) présente un inventaire important de l'impact potentiel de certaines variétés OGM en Suisse et a servi de scénario de base à notre étude. La construction et l'implémentation du modèle ADMC a été réalisée en tenant compte de la littérature scientifique la plus récente ainsi qu'une série de consultations avec les différentes parties prenantes (stakeholders, voire la liste précise en remerciement). Ce modèle essaie de prendre en compte de la manière la plus objective et exhaustive l'ensemble de ces données, rapports et prises de position.

Les spécificités de l'agriculture suisse ont été prises en compte dans l'analyse : la relative petite taille des exploitations (17 ha en moyenne dont un tiers en montagne, OFAG, 2014), la forte inclusion

des systèmes de production dans des labels (IP, bio...) ainsi que la structure particulière des aides publiques à l'agriculture (prestations écologiques requises...). Ces éléments reflètent bien les raisons de la haute exigence en qualité de l'agrosystème suisse et cadrent les possibles conséquences de l'introduction des OGM sur les durabilités socio-économiques et environnementales.

L'étendue des conséquences d'une telle introduction auraient, suivant le cadre légal en vigueur des conséquences en termes de gestions des flux et de conservation de la liberté de choix. L'ensemble de des problématiques rassemblées sous le terme « coexistence » ont été l'objet d'un intense travail prospectif au sein de l'Union européenne (Messean et al., 2006). Nous prendrons ici avantage de ces études et analyserons les conséquences concrètes de la coexistence sur les différents aspects de la durabilité. L'enjeu sera ici d'essayer de distinguer le point à partir duquel les mesures de coexistence nécessaires à la mise en place et au fonctionnement d'une filière OGM rendraient la culture OGM viable économiquement. On note qu'à ce jour, les détails du régime de coexistence en Suisse sont encore en développement.

En réponse directe à l'article 187d.1 de la loi sur l'agriculture, nous présentons ici un outil de diagnostic compréhensif afin de comparer les variations en durabilité des agrosystèmes avec les OGM en comparaison à un équivalent conventionnel. Ce modèle, issu de la compilation de données scientifiques et d'avis d'expert met en lumière les problématiques spécifiques liées à l'introduction des OGM en Suisse et permettra, on l'espère, un dialogue ouvert et constructif qui profitera à la durabilité de nos agrosystèmes.

2 Méthode

2.1 L'analyse de décision multicritère

L'ADMC (Multi-Criteria Decision Analysis ou analyse décisionnelle multicritère) est un instrument qui permet de faciliter la prise de décision basée sur un ensemble de paramètres qualitatifs et quantitatifs qui est couramment utilisé pour tester la durabilité des systèmes (Bohanec et al., 2008, Sadok et al., 2009). Dans ce rapport, le modèle sert à l'évaluation comparative de la culture d'un OGM précis et de la culture et le traitement de son équivalent conventionnel. La méthode DEXi, utilisée précédemment pour évaluer le maïs Bt (Bohanec et al., 2008, Pelzer et al., 2012), a été ici adaptée et implémentée pour correspondre aux agrosystèmes suisses.

La construction du modèle se déroule en plusieurs étapes :

- Choix et définition des critères
- Construction de l'arborescence
- Définition des règles d'aggrégation et des poids relatifs (implémentée dans le logiciel DEXi)
- Définition des scénarios et des limites du modèle
- Analyse des différents scénarios grâce aux données disponibles et aux experts

Les critères de l'arborescence ont été choisis de manière à représenter les différents paramètres influençant la durabilité de la manière la plus exhaustive et la plus équilibrée possible à la fois pour les critères socio-économiques que pour les critères environnementaux. La durabilité socio-économique rassemble vingt et un paramètres regroupant les trois acteurs principaux : agriculteurs, industries et consommateurs. La durabilité environnementale a été évaluée à partir de vingt paramètres représentant la biodiversité, la qualité environnementale et le niveau d'utilisation des ressources. Une définition exacte de chacun des paramètres est donnée dans la section suivante. La construction de l'arbre et le choix des paramètres ont été validé par des experts et acteurs des secteurs concernés.

2.2 Choix des critères

Les critères de la dimension écologique ont été tirés en premier lieu des objectifs environnementaux pour l'agriculture (OFEV et OFAG, 2008). Un élément supplémentaire, qui n'apparaît pas dans les objectifs environnementaux pour l'agriculture, a été retenu parce qu'il joue un rôle important dans l'évaluation des OGM : il s'agit du flux génétique dans les plantes sauvages apparentées (la transmission d'un transgène à des espèces sauvages apparentées) et de l'invasivité dans les habitats naturels (la capacité d'une plante à se fixer dans des habitats naturels non cultivés et à supplanter les organismes qui y sont établis).

Dans la dimension socio-économique, on a veillé à ce que les domaines concernés des trois groupes d'intérêt, à savoir les exploitations agricoles, les autres entreprises du secteur agricole et agro-alimentaire (transformateurs, commerce, réunies sous le terme « agribusiness ») et les consommateurs, soient représentés le plus complètement possible. Ces trois groupes forment la branche principale de la dimension socio-économique, les structures socio-économiques faisant face au bilan des bénéfices en tant que branche autonome (exception domaine consommateurs).

2.3 Définition des critères de durabilité

2.3.1 Critères socio-économiques

Les critères socio-économiques sont regroupés suivant leur influence sur les différents acteurs de la branche : les agriculteurs, les industries en amont et en aval de l'agriculteur puis les consommateurs. L'ensemble des définitions sont résumées dans le tableau 2.

Agriculteur – Bilan des bénéfices – Valeur de la production – Rendement

Le rendement et la qualité des récoltes varient suivant les variétés cultivées. Ces variations peuvent être dues aux propriétés de la variété ou à la modification génétique. Pour ce critère, le rendement et la qualité attendus d'une variété OGM sont évalués par rapport à une variété conventionnelle. En général, c'est le volume de la récolte et la qualité qui détermine les bénéfices en agriculture et en arboriculture. Le critère rendement peut influencer les critères *Coûts de production*, *Chaîne alimentaire*, *Niveau des prix* et *Besoins en ressources sol*.

Agriculteur – Bilan des bénéfices – Valeur de la production – Prix de vente

Le critère *Prix de vente* décrit la modification du prix payé à l'agriculteur pour les produits récoltés. Il peut y avoir une différence de prix pour les marchandises issues de la culture d'OGM par rapport aux marchandises conventionnelles lorsque l'acheteur n'est pas disposé à payer le même prix pour des récoltes d'OGM que pour des récoltes conventionnelles.
L'acheteur paiera éventuellement un prix plus bas en raison de coûts inhérents plus élevés (p. ex. pour assurer la séparation des flux de produits prescrite par la loi). L'acceptation par le consommateur influence aussi les prix : équilibre entre offre et demande. Il faut escompter un prix plus élevé, qui servirait aussi à couvrir des frais de production plus élevés, si l'acheteur s'attend à un avantage-produit. Le critère *Prix* peut être influencé par la chaîne des flux de produits, les prescriptions d'étiquetage et les débouchés commerciaux.

Agriculteur – Bilan des bénéfices – Coûts– Coûts de production

Ce critère évalue la différence des coûts de production entre variété OGM et variété conventionnelle. Pour beaucoup de cultures OGM, la différence principale qui influe sur les coûts de productions réside au niveau du remplacement des pesticides par la semence ou par la semence combinée à d'autres susbtances déterminés. Les frais qui résultent des mesures de coexistence lors de la culture d'OGM sont pris en compte dans l'établissement des coûts de production. Néanmoins, les variations du temps de travail qui en découlent potentiellement ne sont pas prises en compte sous les coûts salariaux, mais sous le critère *Charge de travail*.
Les coûts de production dans la culture sont les suivants :

- Semence : le prix de la semence pour les variétés OGM est en principe plus élevé à cause d'un « bonus » technologique. On part ici du principe que la culture conventionnelle n'utilise que de la semence certifiée, achetée, et non de la « semence de ferme ». Le prix de la semence dépend d'une part du montant que l'agriculteur est disposé à payer, et d'autre part de la concurrence sur le marché des semences et de la politique des prix des entreprises leader sur le marché (NRC, 2010).
- Engrais : les besoins en engrais peuvent changer suivant la caractéristique de l'OGM et dépendent en règle générale du rendement, ainsi que de l'évacuation des résidus végétaux des champs.
- Pesticides : la différence de coûts pour les produits phytosanitaires dépend fortement de la propriété de l'OGM utilisé. Lorsque la modification génétique entraîne la sécrétion d'une substance active contre un parasite (toxine Bt), en principe, les frais de lutte antiparasitaire chutent parce qu'il faut appliquer moins de pesticides.
- Machines et carburant (incl. travail du sol) : les variations des coûts de machines dépendent à nouveau des caractéristiques liées à la gestion des pesticides. De plus, ils varient aussi suivant la gestion de la récolte et de l'après-récolte. La gestion des pesticides peut aussi avoir une influence sur le choix du mode de travail du sol (p. ex. pas de labourage).

- Mesures de coexistence : les dépenses occasionnées par les mesures de coexistence et les frais y afférents dépendent de leur nature. Les mesures de coexistence pour la Suisse sont en cours d'élaboration par les autorités (voir aussi OFEV et OFAG, 2013). L'évaluation des coûts liés aux mesures de coexistence est donc calculée d'après des propositions antérieures (Albisser Vögeli et al., 2011). Ils prennent en compte des coûts supplémentaires d'information, déclaration et formalités, tests (échantillons) ainsi que planification. Le labourage dans la zone d'isolement est en premier lieu associé au travail et à l'emploi des machines.
- Arrosage : les frais d'arrosage dépendent de la région et de la culture, et varient selon la caractéristique de l'OGM cultivé (p. ex. plantes résistantes à la sécheresse).

Agriculteur – Bilan des bénéfices – Coûts – Charge de travail

La charge de travail dépend du système de culture utilisé ; il dépend aussi de la sévérité et de l'interprétation des mesures de coexistence, et comprend aussi l'exécution des formalités administratives. Aucune évaluation monétaire des coûts de transaction n'a été effectuée. La charge de travail est évaluée en heures de main-d'œuvre (MOh) par hectare.

Agriculteur – Structures socio-économiques – Garantie de la propriété et liberté économique

La garantie de la propriété et la liberté économique sont des droits fondamentaux inscrits dans la Constitution fédérale (Constitution fédérale de la Confédération suisse, état 3 mars 2013, art. 26 et art. 27).

Les restrictions dans l'autodétermination de la gestion économique des agriculteurs dépendent entre autres de la législation (moratoire sur le génie génétique, taux de tolérance, mesures de coexistence). Les obligations à charge de l'utilisateur d'OGM peuvent soutenir l'autonomie des producteurs sans OGM. Leur propriété et leur liberté économique sont garanties uniquement si la coexistence appliquée ne les oblige pas à s'écarter de leur mode de production habituelle pour gérer leur exploitation d'après leurs propres objectifs. L'évaluation porte sur la liberté de choix des agriculteurs : plus l'agriculteur est libre de choisir son système de culture, plus sa liberté économique est grande.

Agriculteur – Structures socio-économiques – Acceptation au niveau local

Ce critère décrit la reconnaissance des activités des différents acteurs dans l'environnement local. Il évalue si la culture des OGM est acceptée par les agriculteurs et les voisins non-agriculteurs (p. ex. les apiculteurs). L'acceptation peut contribuer de manière décisive à la faisabilité économique et sociale de la mise en culture d'OGM. Il est par exemple envisageable que les mesures de coexistence en lien avec les distances d'isolement soient plus faciles à appliquer collectivement dans des zones exclusivement dédiées à ces cultures. L'acceptation est favorisée par des mesures de coexistence efficaces et par l'impact sur d'autres produits agricoles (p. ex. le miel).

Agriculteur – Structures socio-économiques – Pratiques agricoles

Les pratiques agricoles comprennent le savoir agricole ainsi que l'expérience et les traditions. L'utilisation, l'entretien et le développement du savoir et des traditions dans l'agriculture contribuent considérablement à la formation de « bonnes pratiques agricoles ». Des éléments sociaux comme les interactions (échange, prêts, aide en cas d'urgence) doivent être prise en compte dans les pratiques agricoles.

Agribusiness – Bilan des bénéfices – Secteur amont – Capacité d'innovation

Ce critère évalue la capacité (savoir-faire, résultats de la sélection) de traiter les questions d'avenir de la culture, que ce soit l'agriculture ou l'arboriculture, de manière autonome et sans frein extérieur. Il s'agit donc de savoir si tous les moyens qui peuvent contribuer à une exploitation agricole durable sont mis à contribution. L'accent est mis sur les nouveaux produits et méthodes de production pertinentes économiquement qui pourraient créer un signal favorable à l'innovation et des avantages concurrentiels.

Agribusiness – Bilan des bénéfices – Secteur amont – Consommation intermédiaire (semence)

Ce paramètre évalue l'éventualité d'un avantage pour le marché suisse des semences apporté par une offre d'OGM. Entrent en jeu dans ce critère l'essentiel de la filière: les sélectionneurs, multiplicateurs et commerçants nationaux. Les sélectionneurs et multiplicateurs de semence existants risquent d'être

confrontés à des exigences supplémentaires pour respecter les normes de pureté suivant les dispositions mises en place par les règles de la coexistence.

Agribusiness – Bilan des bénéfices – Secteur amont – Consommation intermédiaire (pesticides)

Comme les propriétés des OGM testés ici concernent essentiellement les stratégies phytosanitaires, la branche des produits phytosanitaires va être affectée par la modification éventuelle des ventes.

Agribusiness – Bilan des bénéfices – Secteur aval – Flux de produits, préservation de l'identité

Ce paramètre évalue la manière dont une séparation spatiale/temporelle/locale se répercute dans le bilan coût-bénéfice. Il y aurait un certain parallèle possible avec la chaîne des flux de produits biologiques. On évalue également ici les coûts d'évitement dans la perspective de la production sans OGM (voir encadré).

Conditions-cadres de la séparation des flux de produits

La loi sur le génie génétique (RS 814.91) attribue une protection juridique à la production sans OGM. Les mélanges techniquement inévitables sont tolérés jusqu'à un certain seuil (0,9 %). Pour pouvoir identifier les éventuelles sources de mélange et l'origine des aliments en tout temps, il faut instaurer un système de traçabilité totale. Les responsables à tous les niveaux de la chaîne de création de valeur sont tenus de séparer les produits consciencieusement. Les coûts supplémentaires sont causés par les éléments suivants (pour l'essentiel des coûts d'évitement) :

- Transport interne/ externe (chargement, nettoyage, rinçage, logistique, contrôle)
- Distance de transport
- Capacités de stockage
- Formation des collaborateurs
- Analyses de laboratoire (Hirzinger et Menrad, 2005)

La séparation des flux de produits dans l'objectif d'exclure totalement les mélanges est très onéreuse (NFP 59, 2012). Les coûts impliqués dépendent de la structure de la chaîne de création de valeur (capacités, infrastructures, conditions, état). Si la séparation des flux de produits pour un produit est établie, les coûts devraient vraisemblablement diminuer à long terme (Menrad et al., 2009).

Agribusiness – Bilan des bénéfices – Secteur aval – Débouchés commerciaux

Ce critère recense les possibilités pour les producteurs d'écouler leurs produits sur le marché. On évalue les débouchés pour les produits végétaux (transformés), (p. ex. sucre, amidon de maïs, pommes de terre). Les produits animaux à base d'affouragement contenant des OGM ne sont pas évalués car ils ne sont pas soumis à obligation d'étiquetage. Les débouchés commerciaux sont influencés par la demande des consommateurs.

Agribusiness – Bilan des bénéfices – Secteur aval – Impact sur l'approvisionnement

Ce critère évalue si la culture d'un OGM modifie le taux d'auto-approvisionnement (i.e. variation du taux d'importation pour une marchandise donnée) dans le groupe de produits correspondant (produits OGM et produits dérivés). On part du principe que les produits OGM sont en tous points identiques à leurs homologues conventionnels au niveau de leur emploi et qu'ils conviennent tout aussi bien pour une utilisation donnée. Si le taux d'auto-approvisionnement augmente, les importations baissent.

Agribusiness – Bilan des bénéfices – Secteur aval – Bureaux et entreprises de contrôle

Ce critère évalue la tendance suivie par le chiffre d'affaires des bureaux de contrôle privés. En effet, pour garantir que l'étiquetage soit fait correctement et pour vérifier l'application des directives de production, des contrôles sont effectués. Les exploitations soumises à des mesures de coexistence du fait de la culture d'OGM constituent également des sites potentiels à contrôler.

Agribusiness – Structures socio-économiques – Garantie de la propriété et liberté économique

Ce critère évalue les conséquences de la culture d'OGM sur la garantie de la propriété et la liberté économique d'exploitations actives dans les secteurs agricole et agro-alimentaire, et des moyens de production agricoles. Le degré de limitation dans l'autodétermination du mode économique dépend

entre autres de la législation (taux de tolérance, mesures de coexistence). Il décrit si la culture d'OGM limite ou étend l'autonomie de leurs décisions d'entreprise.

Agribusiness – Structures socio-économiques – Effets sur les PME

Ce critère évalue les effets possibles de la culture d'OGM sur les petites et moyennes entreprises (PME). On évalue en particulier les effets sur la compétitivité de ces entreprises, par exemple à la suite de l'application de nouvelles directives ou en raison de transferts de la demande. On trouve des petites et moyennes entreprises (PME) aussi bien dans le secteur amont que dans le secteur aval de l'agriculture : vendeurs de moyens de production, les meuniers, les entreprises de travaux agricoles, les transformateurs (boulangers, bouchers...).

Agribusiness – Structures socio-économiques – Image

Ce critère évalue la possibilité d'une modification de l'image des produits de l'agriculture suisse (et non pas l'image d'un paysan suisse) si des OGM sont cultivés en Suisse à des fins commerciales. L'image que la population se fait de l'agriculture joue un rôle dans l'acceptation et influence les débouchés commerciaux des aliments produits en Suisse.
De nombreux produits et services suisses jouissent en Suisse comme à l'étranger d'une excellente réputation au niveau de l'exclusivité, la tradition et la qualité. Cette bonne réputation constitue un avantage concurrentiel pour positionner les produits et services en lien avec la Suisse dans un segment de prix plus élevé. La plus-value issue de l'origine suisse est d'une importance essentielle (Institut fédéral de la propriété intellectuelle 2013).

Consommateurs – Liberté de choix

Ce critère évalue l'offre du marché au niveau de la possibilité de libre choix. Pour les consommateurs, la liberté de choix constitue un droit fondamental et pour l'assurer, il faut que l'offre de produits soit diversifiée. Le consommateur doit être en mesure d'opter pour un produit ayant les caractéristiques qu'il désire. Quand c'est le cas, le marché peut s'organiser selon le mécanisme de l'offre et de la demande. Certaines règlementations peuvent limiter cette possibilité.

Consommateurs – Qualité sanitaire et toxicologique

Ce critère évalue l'effet de la consommation d'OGM sur la santé. Un effet positif serait par exemple la diminution d'allergènes, d'anti-aliments ou de toxines fongiques.
L'innocuité des OGM sur la santé est examinée en amont de la culture par les autorités fédérales compétentes pendant la procédure d'autorisation (évaluation de la sécurité). Les changements de mode de culture et d'itinéraires techniques peuvent modifier l'application de produits potentiellement nocifs (pesticides) et changer les propriétés sanitaires intrinsèques du produit. L'analyse des risques éventuels se fait sur la base de la littérature et de la consultation des avis des diverses agences sanitaires de pays cultivant des OGM (EFSA, APHIS, USDA, CIRC...).

Consommateurs – Acceptation

Ce critère évalue dans quelle mesure le consommateur considère les produits issus de la culture OGM comme étant équivalents à ceux issus de la culture conventionnelle. L'acceptation des produits par les consommateurs est un facteur décisif en ce qui concerne la demande et le prix qu'ils sont prêts à payer. Il est également intéressant de connaître (par l'intermédiaire de sondages d'opinion) quelle est la proportion des consommateurs chez qui cette technologie rencontre un écho positif : point décisif pour une possible valorisation de l'achat (Albisser Vögeli et al., 2011).

Consommateurs – Niveau des prix

Ce critère tente d'évaluer la formation des prix sur le lieu de vente en fonction de l'évaluation de l'acceptation (préférence) et des coûts d'exploitation. Le niveau des prix des produits issus de la culture d'OGM dépend des consommations intermédiaires et des frais de procédure qu'il est possible de répercuter sur les consommateurs. Si le producteur peut produire plus de marchandise par unité d'intrant, les produits seront éventuellement offerts à un prix plus bas. Mais le niveau des prix dépend aussi de l'acceptation du produit et de l'autorisation à faire partie d'un label.

Tableau 1. Résumé et définitions des critères socio-économiques utilisés pour implémenter le modèle dans les sept scenarios testés. La valeur de chaque paramètre sera évaluée en comparant les systèmes avec OGM et les systèmes sans OGM.

Durabilité socio-économique	
Agriculteurs	
Rendements	Les rendements représentent la portion commercialisable. Ce critère rassemble une combinaison entre rendement théorique et potentiel de diminution du rendement. Ce critère est lié aux coûts de production.
Prix de vente	Le prix de vente est lié à la fois à l'acceptation du public et aux coûts liés à la coexistence
Coûts de production	Les coûts de produtions inclues : prix des semences, engrais, pesticides, diesel, équipements, arrosage, coûts de la coexistence (Albisser Vögeli et al., 2011). De plus hauts coûts ont un impact négatif sur ce critère.
Charge de travail	Evaluation en heures de travail par hectares
Indépendance économique	Ce critère se réfère aux articles de la constitution suisse (art. 26 & 27). Plus le fermier a de choix, plus il est considéré comme indépendant économiquement.
Acceptation locale	Impact des OGM sur les exploitations evironnantes et les autres activités (par exemple l'apiculture) (Schweiger et al., 2009)
Pratiques agricoles	Influences des OGM à l'échelle sociale et traditionelle, inclu les interactions entres agriculteurs
Agribusiness	
Innovation	Prend en compte la capacité à développer de nouveaux produits et de nouvelles methods qui augmenterai la profitabilité et/ou la durabilité des agrosystèmes
Sélection des semences	Influence des OGM sur les firmes de selection et de multiplication en Suisse
Pesticides/Engrais	Influence des OGM sur les revendeurs de pesticides et d'engrais
Flux des produits	Coûts liés à la separation de marchandise sous le regime de la coexistence (transport, distances, stockage, formation, contrôles de qualité) (Menrad et al. 2009)
Marchés	Marchés ciblés en termes de produits alimentaires et dérivés (amidon pour les pommes de terre, sucre pour les betteraves...). Ce paramètre est lié à la demande des consommateurs.
Impact sur l'approvisionnement	Influence des OGM sur les importations. On postule qu'il n'y a pas de changement dans le processing (Aerni et al., 2011)
Entreprises de contrôle	Influence des OGM sur les entreprises en charge des contrôles de qualité. Le maintien d'un régime de coexistence induit des contrôels supplémentaires et a un impact sur les chiffres d'affaires de ces entreprises.
Indépendance économique	Influence des OGM sur la liberté de choix des firmes agroalimentaires.
Effets sur les PME	Influence des OGM sur les petites et moyennes entreprises (par exemple moulins, équipementiers, transformateurs).
Image/Réputation	Impact des OGM sur la perception des entreprises agroalimentaires. L'idéentité suisse et l'exclusivité jouent un rôle important pour ce critère. Cet attribut n'inclus pas l'image des agriculteurs suisses.
Consommateurs	

Liberté de choix	Possibilité de choisir quel produit acheter. Ce critère inclue les standards d'étiquetage et la définition des seuils (Aerni et al., 2011, Bonfadelli et al., 2010).
Impact sanitaire	Influence potentielle de la culture d'OGM sur la qualité et la sécurité des aliments. (par exemple, réduction des mycotoxines, Meissle et al., 2011).
Acceptation	Accepration des OGM par le consommateur, basé sur les résultats de sondages d'opinion (Aerni et al., 2011)
Prix d'achat	La variation des prix d'achat est liée à l'acceptation des OGM par le consommateur, les labels et au système cultural utilise (Price et al., 2003)

2.3.2 Critères de durabilité environnementale

Les vingt paramètres représentant la durabilité environnementale ont été rassemblés sous trois grandes catégories: l'impact sur la biodiversité, sur la qualité environnementale (eau, air, sols) et en termes de besoins en ressources. Là encore, chaque paramètre sera évalué dans le cadre d'une comparaison d'un OGM avec son équivalent conventionnel.

Biodiversité – Conservation de la biodiversité – Espèces OEA (objectifs environnementaux pour l'agriculture)

Ce critère évalue les influences d'une culture d'OGM sur les espèces qui ne sont pas recensées sous l'aspect des fonctions de l'écosystème, mais qui sont présentes en grande quantité sur les surfaces agricoles ou qui dépendent de l'agriculture. On trouve une liste de ces espèces et les bases ayant servi à leur choix dans les « Objectifs environnementaux pour l'agriculture » (OFEV et OFAG, 2008) et dans : « Opérationnalisation des objectifs environnementaux pour l'agriculture. Secteur espèces cibles et caractéristiques » (Walter et al., 2013). Les espèces OEA rassemblent 4 espèces de mammifères, 47 espèces d'oiseaux, 9 espèces de reptiles, 11 espèces d'amphibiens, 149 espèces de papillons, 24 espèces de coléoptères, 2 espèces de névroptères, 84 espèces d'hyménoptères, 48 espèces d'orthoptères, 7 espèces de libellules, 3 espèces de mollusques, 964 espèces de plantes vasculaires, 99 espèces de mousses, 62 espèces de lichens et 182 espèces de champignons.

L'influence potentielle d'un OGM sur des espèces OEA peut être directe ou indirecte et dépend des modifications des pratiques agricoles. Par exemple, pour les OGM résistants aux insectes, sont évalués non seulement les effets des changements dans la gestion phytosanitaire, mais aussi les effets de la toxine produite dans la plante sur les espèces non-cibles du même ordre (p. ex. les papillons pour le maïs Bt). Pour les OGM tolérants aux herbicides, on évalue les effets possibles de la modification de la gestion phytosanitaire, et donc de la lutte contre les mauvaises herbes, sur les différents groupes d'espèces.

L'ordonnance sur les produits phytosanitaires stipule que ces derniers ne doivent pas avoir d'effets secondaires inacceptables sur l'environnement (OPPh, 2010). Sauf indication contraire, les effets des substances actives sur les organismes sont évalués principalement sur la base des informations disponibles dans les banques de données « Pesticide Property Database » (PPDB) (University of Hertfordshire 2013a) et « Bio-Pesticides Database » (BPDB) (University of Hertfordshire, 2013b). Les sources primaires utilisées par ces banques de données regroupent aussi bien les informations publiques des autorités que la littérature scientifique et des banques de données privées (entre autres IOBC Database, EFSA, TOXNET, ARIS Database, U.S. EPA ECOTOX Database, EXTOXNET, PAN Network, etc.). On note cependant que ces banques de données ne disposent pas de données toxicologiques pour les lichens, les mousses, les amphibiens et les reptiles. En ce qui concerne les amphibiens, on part du principe que les menaces auxquelles ils sont exposés peuvent être évaluées sur la base des données relevées pour les poissons, même s'ils réagissent plus fortement à certaines substances que ces derniers (Weltje et al., 2013). De même, on admet que les données relevées pour les oiseaux permettent d'évaluer correctement les dangers pour les reptiles, même s'ils réagissent différemment à certaines substances que ceux-ci (p. ex. Weir et al., 2010). Sauf mention contraire, les effets possibles de la culture d'OGM sur les orthoptères, libellules, papillons, coléoptères et névroptères sont

réunis dans le seul groupe insectes. Les effets sur les insectes utilisés en lutte biologique sont évalués séparément.

Biodiversité – Conservation de la biodiversité – Flux génétique sur des plantes sauvages apparentées et invasivité dans les habitats naturels

Ce critère évalue la probabilité d'un transfert génétique vertical (flux génétique) d'un OGM sur des plantes sauvages apparentées et la capacité de cet OGM à envahir des habitats naturels (invasivité). L'invasivité décrit la capacité de la plante à se répandre et à produire des descendants fertiles loin de son aire naturelle, c'est-à-dire dans des habitats non cultivés. Dans ce cas aussi, on tient compte de la capacité des mesures de coexistence prises à empêcher un tel événement.

Le transfert génétique vertical sur les plantes cultivées conventionnelles n'entre pas dans ce critère. Le transfert génétique horizontal, en d'autres termes la transmission de matériel génétique en-dehors des moyens de reproduction sexués et indépendamment des barrières entre les espèces, n'est pas non plus pris en compte. Un tel transfert génétique horizontal, par exemple des plantes aux bactéries est jugé improbable (Sweet et Bartsch, 2012). Le fait que des espèces sauvages apparentées à la plante OGM soient présente en Suisse (dans le cas du pommier et de la betterave particulièrement) joue un rôle important, tout comme le fait que les mesures de coexistence prises puissent empêcher un flux génétique vers ces dernières.

Biodiversité – Fonctions écosystémiques – Pollinisateurs

Ce critère évalue l'influence de la culture d'un OGM sur la fonction de pollinisation des abeilles mellifères, des abeilles sauvages et des autres pollinisateurs. L'influence peut être directe, par le produit transgène de l'OGM, ou indirecte, par les modifications des pratiques agricoles qui y sont liées (techniques de travail du sol, nature et recours à des pesticides). La toxicité des substances actives sur les abeilles mellifères est évaluée sur la base des informations des banques de données « Pesticide Property Database » (PPDB) (University of Hertfordshire 2013a) et « Bio-Pesticides Database » (BPDB) (University of Hertfordshire, 2013b).

Biodiversité – Fonctions écosystémiques – Lutte biologique

Ce critère évalue l'influence qu'a la culture d'un OGM sur les espèces qui participent à la lutte antiparasitaire naturelle. On pense principalement aux arthropodes prédateurs et parasitoïdes, ainsi qu'aux champignons entomopathogènes. L'influence peut être directe, par le produit transgène de l'OGM, ou indirecte par les modifications des pratiques agricoles qui y sont liées (techniques de travail du sol, nature et recours à des pesticides).

Biodiversité – Fonctions écosystémiques – Fonctions dans l'écosystème sol

Ce critère évalue l'influence de la culture d'un OGM sur des fonctions importantes dans l'écosystème sol, p. ex. la décomposition de matière organique, la conservation de la structure du sol et le recyclage de substances nutritives. Ces fonctions sont remplies par divers groupes d'organismes (divers invertébrés et micro-organismes) qui peuvent être influencés directement par le produit transgène de l'OGM ou indirectement par les modifications dans les pratiques agricoles qui y sont liées (techniques de travail du sol). La modification éventuelle de la pollution du sol par des pesticides est indiquée dans la *Pression sur la ressource sol.*

Biodiversité – Fonctions écosystémiques – Fonctions dans l'écosystème eau

Ce critère évalue l'influence de la culture d'un OGM sur les organismes aquatiques, ainsi que les effets sur leurs fonctions dans l'écosystème eau. Par exemple, la dégradation de la litière et de la matière organique. Les organismes et les fonctions à examiner dépendent de l'OGM considéré. Dans ce critère, on tient en particulier compte des effets possibles du transport de pollen transgénique ou d'autres parties végétales transgènes dans les eaux. La modification éventuelle de la pollution des eaux par des pesticides est indiquée dans la *Pression sur la ressource eau.*

Pressions sur les resources – Atmosphère – Gaz à effet de serre – Dioxyde de carbone

Ce critère évalue l'influence de la culture d'un OGM sur les émissions de dioxyde de carbone. Celles-ci sont principalement dues à la combustion de carburants fossiles. Autant les émissions induites par la

combustion de carburants fossiles lors de la culture (épandage de pesticides et d'engrais, travail du sol) que le transport sont inclus dans l'évaluation.
L'évaluation de ce critère est liée aux critères *oxyde d'azote* et *suie de diesel*.

Pressions sur les resources – Atmosphère – Gaz à effet de serre – Dioxyde d'azote

Ce critère évalue l'émission de dioxyde d'azote. On note que l'emission de dioxyde d'azote émis lors de la combustion de carburants est aussi pris en compte avec le CO_2.

Pressions sur les resources – Atmosphère – Polluants atmosphériques – Suie de diesel

Ce critère évalue l'influence de la culture d'un OGM sur la formation de suies de diesel. La suie de diesel fait partie des particules fines et sont particulièrement nocive pour la santé (Kim et al., 2015). L'évaluation intègre la combustion de carburants fossiles lors de la culture (épandage de pesticides et d'engrais, travail du sol) et lors du transport.
L'évaluation de ce critère est liée à celle des critères *Dioxyde de carbone*.

Pressions sur les resources – Atmosphère – Volatilisation des intrants

Ce critère évalue la volatilisation des pesticides et des engrais (émission indirecte de protoxyde d'azote lié à l'application d'engrais).

Pressions sur les resources – Eau – Run-offs Engrais

Ce critère évalue les effets possibles de la culture d'un OGM et des modifications dans la gestion des engrais qui y sont liées sur la pression qui pèse sur la ressource eau. En général, on admet qu'une augmentation de l'utilisation d'engrais a un impact négatif sur la pollution de l'eau.

Pressions sur les resources – Eau – Run-offs Pesticides

Ce critère évalue les effets possibles de la culture d'un OGM et des modifications dans la gestion des pesticides et leur impact éventuel sur la ressource aquatique.
On admet qu'une diminution de la quantité de pesticides épandus a un impact positif sur la pollution de l'eau. Si on utilise une quantité identique de substances présentant une dangerosité différente pour les organismes aquatiques et/ou des propriétés environnementales différentes (par exemple la capacité d'infiltration, la demi-vie), ces différences entrent dans l'évaluation. Le comportement environnemental et la toxicité des substances actives sont évaluées principalement sur la base des informations disponibles dans les banques de données « Pesticide Property Database » (PPDB) (University of Hertfordshire, 2013a) et « Bio-Pesticides Database » (BPDB) (University of Hertfordshire, 2013b).

Pressions sur les resources – Sol – Charge physique – Erosion

Ce critère évalue les éventuelles modifications du travail du sol (p. ex. no till *vs.* labourage) qui sont liées à la culture d'un OGM et leurs influences sur l'érosion du sol.
L'érosion est la disparition de matière organique du sol. Dans certains itinéraires techniques, la couverture végétale est temporairement éliminée ou éclaircie, ce qui peut renforcer ce phénomène. Dans le cas de l'érosion par l'eau, ce sont entre autres les limons fins riches en substances nutritives qui sont évacués, ce qui réduit la fertilité du sol. L'érosion des sols peut aussi causer des dégâts à des écosystèmes voisins (p. ex. les cours d'eau).

Pressions sur les resources – Sol – Charge physique – Compactage

Ce critère évalue la modification du nombre de passages dans les champs et donc indirectement le compactage des sols. En effet, le passage des machines agricoles peut entraîner le compactage du sol. Ce phénomène rend plus difficile la pénétration des racines et des animaux vivant dans le sol, et nuit ainsi à la fertilité du sol. De plus, la capacité d'infiltration et donc d'absorption des sols compactés est réduite, ce qui favorise le ruissellement superficiel et donc l'érosion. On admet ici qu'une augmentation du nombre de passages dans les champs a un impact négatif sur le compactage du sol.

Besoins en ressources – Eau

Ce critère évalue exclusivement les besoins en eau des plantes cultivées. Sont exclues les modifications indirectes des besoins en eau liés à une modification de la production d'intrants (p. ex. augmentation des besoins par augmentation de la production d'intrants). La Suisse ne connaît en général pas

de pénurie massive d'eau, mais au vues des changements climatiques à venir, il est important de préserver la ressource eau.

Besoins en ressources – Energie

Ce critère évalue les besoins en énergie pour la culture et dans le secteur aval des cultures. Lorsque les trajets d'acheminement s'allongent, ou qu'il faut par exemple construire de nouveaux bâtiments pour assurer la séparation des flux de produits, cela a des effets négatifs sur ce critère. L'évaluation exclut la modification indirecte des besoins en énergie au niveau de la production d'intrants (par exemple augmentation des besoins en énergie liés à l'augmentation de la production d'intrants).

Besoins en ressources – Terrain

Ce critère évalue l'efficience de la culture, en d'autres mots le rendement à la surface. Une augmentation de l'efficience en culture (augmentation du rendement) a des effets positifs sur la ressource terrain. Si la qualité de la récolte reste identique, l'évaluation se fait de la même manière que pour le critère *Rendement*.

Besoins en ressources – Pesticides

Ce critère évalue la consommation absolue en pesticides. A l'exception de l'usage de moyens de contrôle biologiques, cela correspond à la consommation en substances actives par hectare utilisée pour la culture. Les pesticides visent à protéger les plantes contre les organismes nuisibles, régulent leur croissance ou éliminent les mauvaises herbes. La base de calcul de l'énergie nécessaire à leur production a été élaborée par von Green (Green, 1987) et toujours utilisée (Nemecek et Kägi, 2007), malgré le manque de données sur les produits les plus récents. S'il faut utiliser plus de produits pesticide pour une quantité de récolte égale, cela a impact négatif sur ce critère.

Besoins en ressources – Engrais

Ce critère évalue la quantité absolue d'engrais épandue dans les champs. S'il faut utiliser plus d'engrais pour une quantité de récolte égale, cela a un impact négatif sur ce critère.

Tableau 2. Résumé et définition des critères environnementaux utilisés pour implémenter le modèle. Les valeurs de chaque paramètre sont envisagées en fonction de la comparaison entre système de culture OGM et conventionnel pour chaque scénario.

Durabilité environmentale	
Biodiversité	
Espèces OEA	Effets des OGM comparés aux cutlures conventionnelles sur les espèces animals présentes dans les champs ou dependants de l'agriculture. Rassemble: mammifères, oiseaux, amphibiens, reptiles, insects, plantes, mousses et champignons
Flux génétiques	Probabilité de transfert de materiel génétique vers des espéces sauvages de la même famille. Tiens également en compte des transfers horizontaux (plante-bactérie)
Invasivité	Influence du transgene sur les propriétés d'invasivité associées à la coexistence et impact des mesures de coexistences associées à ce risque
Pollinisateurs	Influence des OGM sur l'utilisation et le changement d'itinéraire technique sur l'ensemble des pollinisateurs
Lutte biologique	Influence des OGM sur les organismes utiliés dans la lute biologique (p. ex. arthropodes, champignons entomopathogeniques)
Ecosystèmes des sols	Influence des OGM sur les écosystèmes du sol (sans inclure pollution du sol, reportée dans la section "qualité environnmentale")
Ecosystèmes de l'eau	Influence des OGM sur les écosystèmes acquatiques
Qualité environnementale	
Emissions de CO_2	Influence des OGM sur l'émission de CO_2. Principalement dûes à la consommation de diesel
Emissions de N_2O	Influence des OGM sur les emissions de N_2O. Principalement dûes à la consommation de diesel
Volatilisation d'intrants	Influence des OGM sur la volatilisation de pesticides et de protoxyde d'azote après application d'engrais
Diesel	Influence des OGM sur les émissions de diesel et de particules fines
Run-offs pesticides	Influence des OGM sur le dégagement de pesticides (run-offs)
Run-offs engrais	Influence des OGM sur le dégagement d'engrais (run-offs)
Risques d'érosion	Influence des OGM sur les risques d'érosion. Par exemple, l'utlisation ou pas de labourage
Risques de compactage	Influence des OGM sur le compactage du sol, depend des changments d'itinéraire technique
Utilisation des ressources	
Eau	Influence des OGM sur l'utilisation en eau. N'inclue pas les consommations indirectes
Energie	Influence des OGM sur la comsommation en énergie : pour les secteurs en amont, en aval et les coûts supplémentaires liés à la coexistence
Sols	Influence des OGM sur l'utilisation du sol. Lié aux variations de rendements par hectare.
Engrais	Influence des OGM sur la quantité d'engrais utilisé pour un même rendement

2.4 Arborescence et règles d'agrégation

Nous avons décrit l'ensemble des paramètres constituant le modèle d'évaluation de durabilité dans la section précédente. L'étape suivante de constrcution du modèle ADMC a pour but de les coordonner et de construire une arborescence capable de refléter au mieux la complexité de la durabilité en tant que composite d'une multitude de critères quantitatifs et qualitatifs. La construction des arborescences, la définition des règles d'agrégation, le poids des critères ont été définis en combinant des rapports d'expertises commandités pour ce projet, des résultats du programme national de recherche 59 (PNR 59) ainsi que des données adéquates issues de la littérature scientifique (Figure 1 et 2). L'avantage de l'analyse MCDA comparée à d'autres méthodes telles que le quotient d'impact environnemental (EIQ, Kowach et al.,1992) est de pouvoir permettre une meilleure flexibilité par rapport au choix et à l'impact de chacun des paramètres. L'EIQ a en effet été utilisé principalement dans l'analyse de risque des pesticides et se focalise classiquement sur les aspects de toxicité. Dans le modèle présenté ici, au-delà de la prise en compte de l'impact environnemental, d'autres aspects plus généraux comme les changements induits par les OGM sur les itinéraires techniques sont aussi pris en compte.

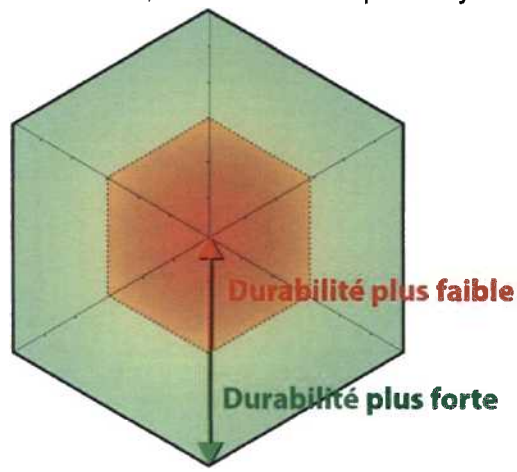
Dans la dimension socio-économique, les informations disponibles permettent de recenser les aspects générateurs de coûts au niveau qualitatif. Elles ne conviennent que partiellement pour des indications quantitatives fiables quant aux surcoûts spécifiques aux agrosystèmes suisses (Kohler, 2005). L'évaluation porte donc principalement sur l'observation de modifications par rapport à l'équivalent conventionnel.

De façon générale, l'évaluation se fait de manière comparative selon le schéma suivant : la durabilité des systèmes culturaux avec OGM sont comparés avec leur équivalent conventionnel. Un score sur une échelle de 5 est utilisé (-2, -1, 0, 1, 2). La durabilité des systèmes OGM est beaucoup plus faible (-2), plus faible (-1), égale (0), meilleure (1), bien meilleure (2) que leur référence conventionnelle. Pour illustrer ce système on prendra deux exemples :

- Les betteraves OGM tolérantes aux herbicides (HT) permettent de réduire la consommation de carburant par la réduction du nombre de spray. Le paramètre « diesel » aura une valeur de « +1 » dans le cas du scénario betterave HT A (Tableau 3 et 4).
- L'utilisation des betteraves HT a par contre reçu un accueil très réservée de la branche et des consommateurs, le paramètre « acceptation du public » sera donc d'une valeur de « -2 » dans les deux scénarios A et B (Tableau 3 et 4).

La construction du modèle a ensuite été implémentée dans le logiciel « DEXi » (Bohanec et al., 2008). On notera qu'afin de pouvoir garder une certaine définition dans les résultats finaux, l'échelle utilisée dans les rangs 2 et 3 de l'arborescence a été graduée avec non plus 5 mais 7 échelons, comme conseillé dans le manuel de DEXi. Les résultats des différentes analyses de durabilité suivant les scénarios ont été résumés sur des « radar plots » générés par le logiciel (Figure 1).

Figure 1. Description du modèle de plot radar utilisé pour synthétiser les résultats des analyses MCDA extraites du logiciel DEXi. Chacun des six angles de l'hexagone représente une composante de la durabilité exprimée le long d'un axe centrifuge. Plus le degré de durabilité est élevé, plus le paramètre s'éloigne du centre. Une zone rouge délimite la zone pour laquelle les systèmes OGM sont moins durables que les systèmes conventionnels, la zone verte lorsque les systèmes OGM sont plus durables.



Sur ces graphiques, la durabilité des systèmes contentant des OGM par rapport à leurs équivalents conventionnels est exprimée. Plus la durabilité est mauvaise relativement, plus le point est au centre (zone rouge), plus la durabilité est bonne, plus il s'en éloigne (zone verte). Dès lors, la ligne entre zone rouge et verte montre qu'aucun changement n'a été mesuré ou postulé entre les deux systèmes pour ce scénario. Cette schématisation rassemble en une seule figure pour chacun des scénarios les six grandes composantes de la durabilité environnementale et socio-économique : agriculteurs, consommateurs, agribusiness, biodiversité, qualité environnementale et utilisation des ressources.

Figure 2. Structure de l'arbre utilisé dans le modèle ADMC pour évaluer la durabilité socio-économique des variétés OGM comparées aux variétés conventionnelles. Les données pour trois acteurs ont été analysées: exploitants agricoles (jaune), agribusiness (orange) et consommateurs (rouge).

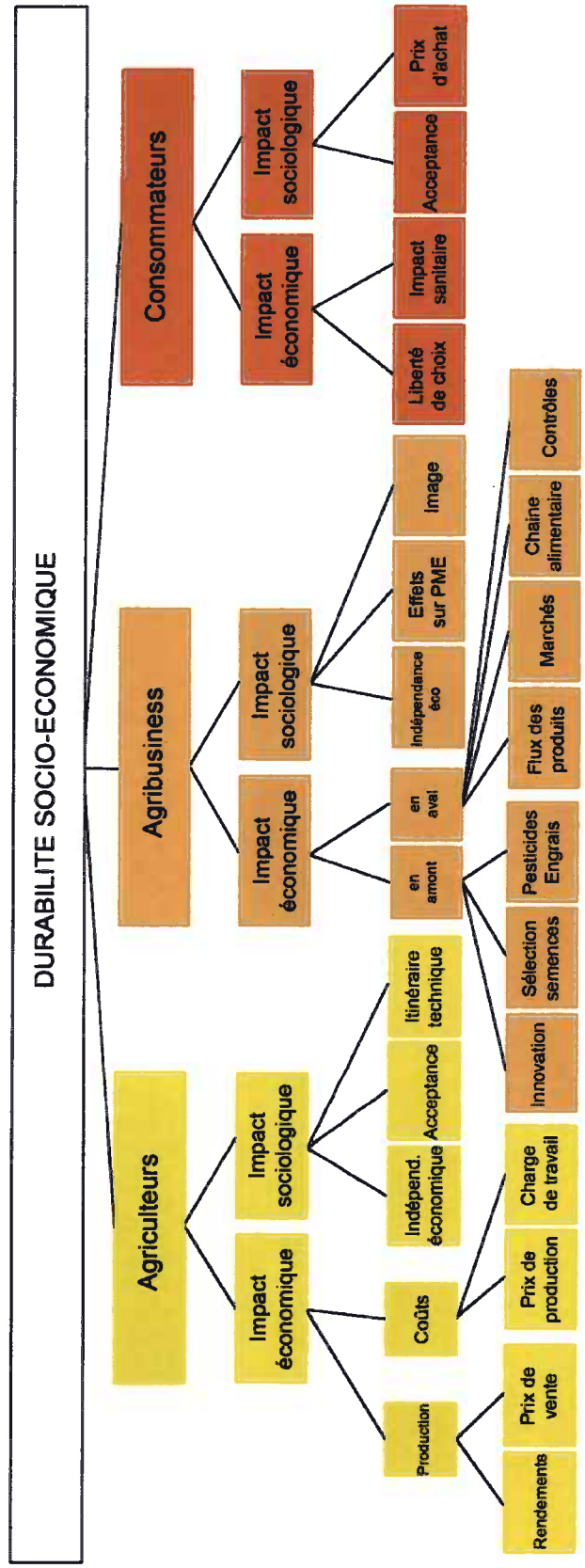
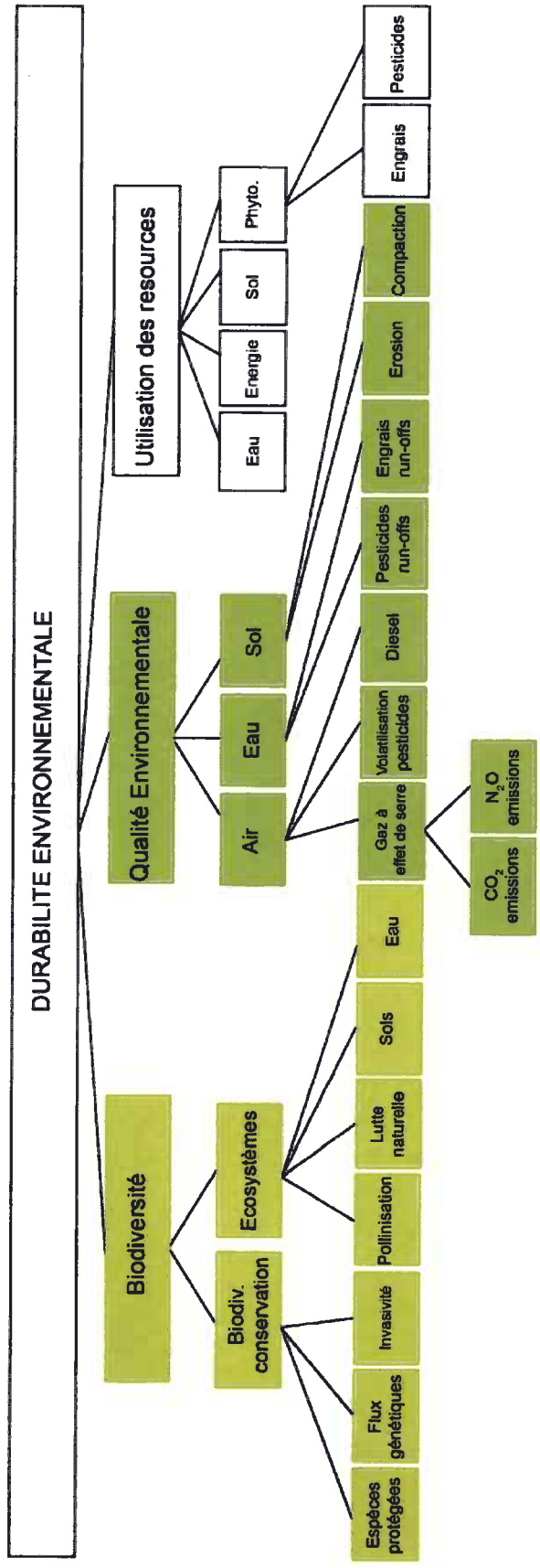


Figure 3. Structure de l'arbre utilisé dans le modèle ADMC pour évaluer la durabilité environnementale des variétés OGM comparées aux variétés conventionnelles. Les données pour trois aspects ont été analysées: biodiversité (vert clair), qualité environnementale (vert), utilisation des ressources (blanc).



2.5 Comparaison de sept systèmes culturaux contenant des OGM à leur équivalent conventionnel

On a choisi dans ce rapport d'utiliser des cultures stratégiques pour l'agriculture suisse pour lesquelles des OGM ont déjà été utilisé dans d'autres pays et dont les lignées sont soit accessibles commercialement soit développées et testées en Suisse. Il est important de noter toutefois que ce choix ne préjuge en rien les décisions des autorités en termes d'éventuelle autorisation/interdiction. On a choisi de comparer sept scénarios : trois scénarios utilisant le maïs résistant à la pyrale exprimant la toxine Bt, deux scénarios utilisant la betterave tolérante à l'herbicide glyphosate, un scénario utilisant des pommes de terre résistantes au mildiou puis un scénario utilisant des lignées de pommiers de variété « Gala » résistants à la tavelure et au feu bactérien (Tableau 3).
Dans les sections suivantes, pour chacun des scénarios, une justification précise du score est indiquée et résumée dans le tableau 10.

Tableau 3. Description des scenarios analysés par le modèle ADMC. Bt, lignée qui exprime une toxine Bt, HT tolérant aux herbicides (ici glyphosate), FR, résistant au champignon (tavelure pour les pommiers), RM, résistant aux midiou, BR, résistant au feu bactérien.

Evènement	Scenarios
Maïs Bt[1]	**A**. séparation des flux + *Trichogramma*
Maïs Bt[1]	**B**. pas de separation des flux + *Trichogramma*
Maïs Bt[1]	**C**. séparation des flux + Insecticide
Betterave HT[2]	**A**. faible pression des adventices
Betterave HT[2]	**B**. forte pression des adventices
Pomme de terre RM[3]	Infection au mildiou moyenne
Pommier FR-BR[4]	Infections au feu bactérien et à la tavelure

[1] Pour les scenarios intégrant le maïs, deux paramètres ont été testé en parallèle : la contribution de l'OGM aux flux en aval de la ferme et à la coexistence (A vs B) ou la comparaison entre différentes stratégies afin de contrôler les dégâts créés par les lépidoptères (A vs C). Il faut noter qu'on postule qu'aucun auxiliaire biologique de type Trichogrammma n'ont été utilisé dans les scénarios A et B (étant de fait résistant aux lépidoptères). Des itinéraires techniques les plus similaires possibles (arrosage, fertilisation, désherbage, préparation du sol) ont été postulés pour les trois scénarios. L'usage d'insecticide pour le scénario C'est uniquement possible sous dérogation (inoxacarb ou spinosad).

[2] On ne postule aucune différence dans les itinéraires techniques entre betterave OGM et conventionnelle. Les herbicides (cocktail de triazines et benzofuranes) sont appliqués trois fois pour les betteraves conventionnelles (avec une chronologie différente suivant le niveau d'infestation (A vs B), et deux fois pour le glyphosate dans le cas de la betterave OGM.

[3] La quantité de fongicide utilisée pour pallier à l'infection de Phytophtora dépend énormément des conditions climatiques et de la variété de pomme de terre utilisée. Par exemple, « Fortuna » peut être utilisée comme variété OGM et comparée à « Agria », très communément utilisé en Suisse. Il est postulé ici une seule faible infection au cours de la culture. La séparation des flux entres OGM et conventionnelles se feraient suivant les règles de la coexistence.

[4] Les traits de résistance à la tavelure et au feu bactérien sont ici introgressés dans des pommiers de variété "Gala". L'application de fongicides et d'antibiotiques serait réduite mais pas entièrement supprimée dans le cas de la lignée OGM. De plus, pas de coûts supplémentaires ne sont pris en compte au niveau de la semence, comme les variétés seraient libres de droit (communication personnelle, Agroscope).

2.6 Limites de la modélisation

Comme pour toute modélisation, le modèle présenté ici a des limites que nous définissons précisément. Ces limites sont liées au fait que nous analysons ici des scénarios hypothétiques « *ex ante* » et n'avons aucune donnée réelle à disposition sur la culture d'OGM en Suisse à ce jour. En effet, pour un certain nombre de paramètres, l'évaluation issue de la majorité des experts consultés a été prise en compte :

- De manière générale, on a postulé que l'efficacité des propriétés conférées par les OGM utilisées étaient optimales (effet radical de la toxine Bt sur les populations de pyrale, effet majeur du glyphosate sur les populations d'adventices et effet également majeur sur les bactéries et champignon visés). Dès lors, l'apparition d'adventices résistantes dans la culture de plantes résistantes aux herbicides (Brookes & Barfoot, 2013, Green, 2014) ainsi que la résistance de certains insectes aux toxines Bt (Jin et al., 2015) n'a pas été prise en compte bien que rapportées dans la littérature. De manière plus générale, les dynamiques d'évolutions de résistances dans le temps lors de l'utilisation de pesticides ou lors de monocultures (pests displacements) n'ont pas été prises en compte.

- En Suisse, les agriculteurs produisent pour une large majorité conformément aux directives des prestations écologiques requises (PER), car c'est une condition pour l'octroi de paiements directs. On part donc de l'hypothèse que la culture, aussi bien des OGM que des variétés conventionnelles, se fait selon les règles PER (rotation des cultures, engrais etc.). On admet dans le même temps que la culture d'OGM donne droit aux mêmes paiements directs que la culture de variétés conventionnelles.

- La réglementation liée à d'éventuelles mesures de séparations des flux et de manière générale liée à la coexistence de filières « non-OGM » et « OGM » sont en cours d'élaboration (OFEV et OFAG, 2013). Les conséquences de cette nouvelle régulation en termes de responsabilité civile, pollution environnementale et charges administratives (permis, autorisation) ne sont prises en compte que partiellement dans ce rapport, étant dans l'impossibilité de savoir quel régime exact sera utilisé après la fin du moratoire.

- Les conséquences pour la santé de la manipulation de pesticides et engrais pour les agriculteurs ou les transformateurs ne sont pas prises en compte dans l'analyse.

- L'analyse se limite des scénarios médians de culture sur le plateau suisse.

- Importation de fourrage. Le renoncement momentané à l'importation de fourrage OGM est une décision de la branche alimentaire suisse. Renoncer à l'importation de fourrage équivaudrait à des économies de 7 à 60 millions de francs par an (Mann, 2013, Dahinden et al., 2014). Cet aspect n'est pas pris en compte dans l'analyse.

3 Résultats

3.1 Maïs Bt

3.1.1 Introduction

Le maïs Bt contient un gène qui encode une protéine insecticide (la toxine Bt produite par *Bacillus thurigiensis*). Cette toxine est utilisée dans une très grande proportion des OGM cultivés à ce jour (ISAAA) et sous de nombreuses variantes. Elle cible en particulier les insectes de la famille des lépidoptères. Le seul OGM cultivé à ce jour dans l'Union Européenne est le maïs MON810 exprimant la toxine cry1Ab, développé dans les années 1990 par Monsanto (USA). Le MON810 vise à contrôler les populations de la pyrale du maïs (*Ostrinia nubilis*). Sa grande popularité (Brookes et Barfoot, 2014) a sans doute participé à l'apparition de résistances dans les populations de ravageurs (Qaim, 2009). Le recul de l'expérience espagnole et portugaise sur la culture du MON810 permet d'accéder à un certain nombre de données qui fait défaut pour d'autres évènements (Albisser Vögeli et al., 2011, Dietiker et al., 2011, Speiser et al., 2013). En Suisse, l'importation de maïs MON810 est autorisée pour l'alimentation animale et humaine OSALA, 916.37 et ODAIGM, 817.022.51).

La définition des scénarios suivants est dépendante de la forme dans laquelle le maïs produit va être utilisé. En Suisse, la majeure partie de la récolte de maïs aboutit dans l'alimentation animale sous forme de maïs ensilage. Environ 75 % des surfaces cultivées avec du maïs sont destinées au maïs ensilage, les 25 % restants, au maïs grains (rapport agricole 2014). Le maïs ensilage reste sur l'exploitation et n'est éventuellement commercialisé qu'entre agriculteurs ; l'auto-approvisionnement est couvert pour le pays. Le maïs grains est une autre forme d'alimentation animale ; il passe par les centres collecteurs pour aboutir aux moulins à fourrage. Le taux d'autosuffisance pour le maïs grains se situe aux environs de 70 %. Certaines variétés de maïs spéciales sont également cultivées pour l'alimentation humaine, mais la proportion concernée reste faible et limitée à certaines règions (taux d'auto-approvisionnement < 1 %). Pour la fabrication d'amidon de maïs et d'huile de germe de maïs, les moulins suisses transforment essentiellement du maïs étranger. Dans une faible mesure, certaines régions cultivent et transforment aussi du maïs sucré, par exemple Unicorn à Rheusstal (AG) (Wüthrich et al., 2006).

La pyrale du maïs est présente en suisse depuis 2013 mais l'ampleur des attaques varie fortement suivant les régions. Dans certains endroits, les seuils de tolérance économique sont dépassés. D'après agridea (2014), ces seuils se situent pour le maïs grains à une proportion de 10 à 20 % de plantes touchées, pour le maïs ensilage entre 20 et 30 %. Des dégâts particulièrement importants sont survenus dans les cantons de Vaud et de Fribourg, où il s'est développé jusqu'à deux générations de pyrale du maïs par an (race bivoltine). Pour lutter contre ces races bivoltines, certains services cantonaux de protection des végétaux ont délivré des autorisations spéciales pour des applications d'insecticides. Il n'est normalement pas permis d'utiliser des insecticides pour lutter contre la pyrale du maïs. D'après les estimations de la branche, des guêpes parasitoïdes *Trichogramma* sont répandues sur environ 10 % des surfaces suisses de maïs. Cette proportion est reprise dans notre analyse pour la culture des maïs conventionnels. Appliquée correctement, la lutte biologique contre le maïs affiche un taux d'efficacité d'environ 70 % (Strickhof, 2012a).

3.1.2 Scénarios

Scénario A

*Culture de maïs **avec séparation des flux** de produits dans le secteur aval. Lutte conventionnelle contre la pyrale du maïs avec les guêpes parasitoïdes **Trichogramma***

Dans le scénario A, le maïs récolté entre dans le flux des produits. Ce scénario s'applique donc au maïs grains, qui est transformé en fourrage et en aliments dans un moulin. Il en résulte différents éléments de mélange fourrager qui sont utilisés pour l'alimentation de la volaille et en complément alimentaire pour les bovins (Wüthrich et al, 2006). Cette transformation implique des coûts supplémentaires dans le secteur aval, car il faut respecter la séparation du flux de produits, ainsi que les prescriptions d'étiquetage.

On postule que pour la culture de maïs Bt, la lutte avec les *Trichogramma* s'avère inutile (Tableau 4), car ce maïs excrète la toxine Bt (Cry1Ab, par exemple) toxique pour la pyrale du maïs. Dans le scénario A, on admet que la culture de maïs Bt et celle de variétés conventionnelles ne se distinguent qu'au niveau de la lutte contre la pyrale du maïs, et qu'il n'y a pas de modifications à d'autres niveaux (engrais, arrosage, lutte contre les mauvaises herbes, travail du sol).

Tableau 4 : Applications d'insecticides pour contrôler la pyrale du maïs dans la culture conventionnelle de maïs dans les scénarios A et B.

Système de culture	Produit	Substance active	Quantité de substance active (femelles / ha)	Prix (CHF / ha)
Conv.	Trichocap Plus	*Trichogramma brassicae Bezdenko*	1 x 140000	147.9[1]

Les hypothèses suivantes s'appliquent :

- Pour le transport du maïs Bt jusqu'à l'acheteur, le trajet est plus long, car tous les acheteurs ne sont pas prêts à accepter ce maïs (consultation experts).
- Dans le secteur aval, il n'est pas construit de sites de productions supplémentaires. Le flux de produits est séparé dans le temps et / ou dans l'espace sur différentes lignes de production déjà existantes. Cette mesure peut occasionner des trajets d'acheminement plus longs (voir plus haut).
- L'épandage de *Trichogramma* se fait à la main. Cette stratégie n'engendre donc pas de surconsommation de carburant. L'application de *Trichogramma* se fait conformément à l'OPD (ordonnance sur les paiements directs, 2013).

Scénario B

*Culture de maïs **sans séparation des flux** de produits dans le secteur aval. Lutte conventionnelle contre la pyrale du maïs avec les guêpes parasitoïdes **Trichogramma***

Dans le scénario B, il n'y a pas de transformation de la récolte dans le secteur aval. La culture se concentre donc sur le maïs ensilage et le maïs vert, qui sont donnés en fourrage aux animaux de rente sur l'exploitation. Pour le reste, les hypothèses de culture du scénario A sont valables. D'après les prescriptions légales en vigueur, les produits animaux issus d'animaux nourris avec du fourrage OGM n'ont pas besoin d'afficher une étiquette indiquant que les animaux ont été nourris avec du fourrage OGM. Les produits sont toutefois exclus d'une série de labels (par exemple IP ou Bio).

Scénario C

*Culture de maïs **avec séparation des flux de produits** dans le secteur aval. Contamination par la pyrale du maïs bivoltine. Lutte chimique contre la pyrale du maïs par des **insecticides***

Dans le scénario C, le maïs grains cultivé est infesté par la race bivoltine de pyrale du maïs. La lutte avec *Trichogramma* est inefficace dans ces conditions. Dans la culture conventionnelle du maïs, des insecticides peuvent être appliqués (Tableau 5) avec une autorisation spéciale. En 2013 par exemple, il a été déposé 56 demandes d'application d'insecticides. Dans le canton de Vaud, 350 hectares environ ont été touchés, ce qui correspond à quelque 4,4 % de la surface de maïs suisse. En 2012, 69 parcelles ont été traitées aux insecticides (indoxacarb et spinosad). Le maïs récolté est transformé en fourrage ou en aliments, comme dans le scénario A.

Le scénario C diffère du scénario A par la condition suivante :

- Dans la culture conventionnelle, les deux insecticides indoxacarb et spinosad sont appliqués en respectant les indications du répertoire des produits phytosanitaires sous autorisation spéciale.

[1] fenaco, UFA-Semences Auxiliaires : accessible sous http://www.nuetzlinge.ch/fr

Tableau 5. Applications d'insecticides pour contrôler la pyrale du maïs dans la culture conventionnelle dans le scénario C.

Système de culture	Produit	Passages, dosage (l, kg / ha)	Substance active (g / l, kg)	Coformulants	Quantité de substance active (kg / ha)	Prix du produit (CHF/ l, kg)	Prix (quantité totale) CHF
Conv.	Steward ou Audienz	1 x 0.125 ou 1 x 0.2	300 Indoxacarb ou 480 Spinosad	non connu	0.0375 ou 0.096	547.2[2] ou 623.00[3]	68.4 ou 124.6

[1] Chez Stähler Suisse SA, accessible sous : http://www.staehler.ch/de/produkte/info/steward-1.html
[2] Chez Omya (Suisse) SA Agro

3.1.3 Evaluation de la durabilité

3.1.3.1 Critères socio-économiques

Agriculteur – Bilan des bénéfices – Valeur de la production – Rendement

Les données de la littérature relatives aux rendements du maïs Bt sont contradictoires. Dans une revue de la littérature, Wolf et Albisser Vögeli (2009) concluent que pour une attaque d'intensité faible à moyenne de pyrale du maïs, les variétés hybrides conventionnelles surclassent le maïs Bt en ce qui concerne le rendement. Par ailleurs, les résultats de la culture de maïs Bt en Espagne montrent une étroite relation entre infestations de parasites et différences de rendement. Dans les régions à faibles attaques de parasites, le rendement est resté similaire (Gómez-Barbero et Rodriguez-Cerezo, 2006). Il semblerait que l'avantage principal du maïs Bt réside dans la compensation de pertes de rendement en cas de forte attaque parasitaire, laquelle peut varier fortement dans un même pays (Gómez-Barbero et al., 2008). Pour pouvoir effectuer une comparaison directe des rendements, il est capital de choisir des variétés étroitement apparentées, comme ce fut le cas par exemple dans l'essai de Schiefer et al. (2008). Dans cet essai, il n'a pas été mesuré de différences de rendement significatives ; les rendements moyens durant la période d'essai ont été élevés et l'effet des insecticides et du maïs Bt sur le rendement est nul lors d'une faible attaque de pyrale (Schiefer et al., 2008 / Mildner et al., 2011).

Pour conclure, le rendement dépend de la variété dans laquelle est introduite le gène Bt, du climat et de l'intensité de l'attaque du ravageur (Gómez-Barbero et al., 2008). En conséquence, le paramètre « rendement » a donc été évalué comme suit :

Evaluation des scénarios A et B : 0

La culture de maïs Bt n'apporte pas de rendement supplémentaire, car la pression des parasites est modérée dans ces scénarios.

Evaluation du scénario C : +1

La culture de maïs Bt entraîne un rendement supplémentaire, car les pertes dues à l'infestation de parasites en culture conventionnelle ne peuvent être que partiellement compensées par des applications d'insecticides (BMBF, 2011). En effet, le succès du contrôle chimique dépend fortement de la période d'application (Meissle et al., 2011).

Agriculteur – Bilan des bénéfices – Valeur de la production – Prix de vente

Dans le cadre juridique actuel, les acheteurs et les commerçants doivent étiqueter le maïs qui est génétiquement modifié. Il est probable qu'il en résultera des prix plus bas pour l'agriculteur qui fournit des OGM, du fait de la pression exercée sur les producteurs de matière première (les agriculteurs) par les acheteurs en raison des coûts supplémentaires d'étiquetages (Kohler, 2005). Des prix plus élevés pour les produits contrôlés sans OGM sont aussi vraisemblables (price premium) (Bock et al., 2002). En témoigne l'importance croissante des systèmes de préservation de l'identité, comme les flux de produits séparés qui sont mis en place lorsque certaines caractéristiques de qualité doivent permettre d'obtenir des prix plus élevés (filière biologique). (Oehen et al., 2006).

Evaluation dans les scénarios A et C : -1

Les agriculteurs obtiennent un prix plus faible pour un produit OGM lorsque la garantie sans OGM est considérée comme une plus-value.

Evaluation dans le scénario B : 0

Comme l'agriculteur ne doit pas déclarer que le produit transformé (viande) a été obtenu avec du fourrage OGM, le prix pour ce produit ne change pas.

Agriculteur – Bilan des bénéfices – Coûts variables – Coûts de production

L'abandon de *Trichogramma* constitue une économie importante au niveau phytosanitaire, alors que l'on constate des surcoûts au niveau des semences et de l'application des mesures de coexistence. Dans le cas de conditions de coexistence sévères (Albisser et al., 2011, scénario « défavorable »), 16 % des coûts de production par hectare sont liés aux mesures de coexistence, alors que pour des conditions de coexistence moins sévères, cette proportion se situe aux environs de 5 % (Albisser et al., 2011, scénario « moyen »). Selon les hypothèses de départ du scénario C, les coûts de production ne tiennent pas compte des coûts liés aux insecticides, lesquels sont inférieurs à ceux de *Trichogramma* (voir tableau 1).

Les coûts directs d'engrais, d'assurance-grêle et de séchage sont associés au critère *rendement*. Des prix plus élevés pour les semences OGM sont souvent constatés (p. ex. Gómez-Barbero et al., 2008 / Schiefer et al., 2008). Pour garantir la rentabilité de la culture de maïs Bt ces surcoûts doivent être compensé au niveau des autres coûts de production ou par une amélioration substantielle des rendements.

Evaluation dans tous les scénarios : -1

En raison du prix de la semence plus élevé et des mesures de coexistence, les coûts de production de maïs Bt augmentent par rapport à ceux du maïs conventionnel.

Agriculteur – Bilan des bénéfices – Coûts variables – Charge de travail

En raison des mesures de coexistence prescrites, il faut s'attendre à une augmentation de la charge de travail. Son ampleur dépend à nouveau de la sévérité de ces mesures. Le temps consacré aux mesures évoqué par Albisser et al. (2011) dépasse dans tous les cas celui consacré à l'épandage de *Trichogramma*. Pour l'abandon de *Trichogramma*, Eggenschwiler (1999) cite un gain de temps d'environ 1 MOh par hectare, alors que Strickhof (2012a) évoque un temps de 15 à 30 minutes par hectare. Dans les scénarios A et B, on part du principe que la culture de maïs Bt permet de renoncer à l'épandage de *Trichogramma*. Le temps gagné par les agriculteurs qui devraient utiliser des *Trichogramma* dans la culture de maïs conventionnel est significatif. Le gain de temps réalisé du fait du renoncement à l'épandage d'insecticides (scénario C) s'élève à 0,86 MOh par hectare (agridea, 2013b).

Une autre mesure à prendre en compte dans la culture du maïs Bt est le nettoyage des semoirs et des moissonneuses-batteuses. Ce travail est particulièrement long (Kohler, 2005). Il est possible que ces étapes de nettoyage après les semis ou le battage doivent être effectuées plus souvent que pour la culture de maïs conventionnel.

Evaluation des scénarios A et B : -1

En raison des mesures de coexistence, la charge de travail dans la culture de maïs Bt dépasse la charge de travail nécessaire pour l'épandage de *Trichogramma* dans la culture de maïs conventionnel.

Evaluation du scénario C : -1

La charge de travail nécessaire à l'application d'insecticides dans la culture traditionnelle est également plus faible que celle nécessaire à l'application des mesures de coexistence dans la culture de maïs Bt.

Agriculteur – Structures socio-économiques – Garantie de la propriété et liberté économique

Le degré de garantie de la propriété et de liberté économique est déterminé par les conditions prescrites pour la garantie de la coexistence. Celles-ci doivent être adaptées à l'utilisation des OGM et ne pas être restrictives (Demont et Devos, 2008). Le degré de garantie de la propriété et de la liberté économique augmente lorsque la culture d'une variété OGM est possible. L'autorisation des OGM permet aux agriculteurs de choisir parmi une gamme de systèmes de culture plus large. Si les mesures de coexistence sont efficaces, elles permettent également aux producteurs voisins de cultiver librement ce qu'ils désirent.

Evaluation dans tous les scénarios : +1

Agriculteur – Structures socio-économiques – Acceptation au niveau local

L'acceptation d'activités agricoles au niveau local est très délicate en ce qui concerne les OGM. Le sondage de Schweiger et Szerencsits (2009) réalisé parmi les agriculteurs de la région de Zurich montre que la disposition à cultiver des OGM dépend fortement du déterminant « exploitation présumée des voisins ». L'acceptation est aussi dépendante du régime de responsabilité civile en vigueur (décrit par les règles sur la coexistence). D'autres acteurs au niveau local qui sont concernés dans une certaine mesure par la culture de plantes génétiquement modifiées sont les apiculteurs (prise de position sur le projet de coexistence d'Apisuisse, 2013). Les apiculteurs sont défavorables à la culture d'OGM parce qu'il n'est pas possible d'empêcher l'arrivée de pollen OGM dans leur miel. Dans l'étude de Schweiger et Szerencsits (2009), l'hypothèse d'un conflit potentiel entre les différents types de culture n'a pu être clairement réfutée.

Evaluation dans tous les scénarios : -1

Agriculteur – Structures socio-économiques – Pratiques agricoles

Avec la culture de maïs Bt, les agriculteurs adaptent leurs itinéraires techniques avec une lutte contre les insectes plus efficace, mais aussi d'autres exigences (zones tampons exigées...). On note cependant que les méthodes de lutte biologique requièrent également une réorganisation (Meissle et al., 2010).

Evaluation dans tous les scénarios : 0

Agribusiness – Bilan des bénéfices – Secteur amont – Capacité d'innovation

La culture de maïs Bt permettrait d'étudier la pertinence de cette technologie pour la Suisse. On peut penser qu'en respect avec un déploiement étape par étape, conformément à la législation, suffisamment de données pourraient informer sur les avantages et les limitations d'un tel système. Il serait également intéressant de profiter des données disponibles dans les pays où la technologie Bt a déjà de longues années d'expériences en champ afin d'en dégager le plus de bénéfice possible en terme de connaissance et de savoir-faire. On peut penser que l'étude de variétés cumulant plusieurs types de toxines Bt (type Smartstax) serait potentiellement intéressante en termes de durabilité des résistances (bien que nécéssitant en amont des analyses de risque additionelles).

Evaluation dans tous les scénarios : +1

On postule que la culture d'OGM pourrait avoir un impact positif sur la place de recherche et d'innovation suisse.

Agribusiness – Bilan des bénéfices – Secteur amont – Semences

Actuellement en Suisse, seuls trois acteurs principaux sélectionnent du maïs : DSP, Sativa et l'association Ribelmais. A priori, ces entreprises ne disposent ni la volonté ni les moyens pour intégrer de la technologie génétique dans leur programmes de sélection. Leur position concurrentielle, ainsi que celle des multiplicateurs en aval et donc des participants au marché nationaux, pourrait donc se détériorer si du maïs OGM était introduit. D'un autre côté, le maïs national n'occupe aujourd'hui déjà qu'un segment de marché étroit. Il est possible que de grandes entreprises de semences coopèrent avec des sélectionneurs et des multiplicateurs locaux. Sur le marché des semences, l'offre en OGM représente une extension de l'offre. Pour les entreprises de la branche suisse des semences, cela présente des opportunités mais aussi des risques.

Evaluation dans tous les scénarios : -1

Agribusiness – Bilan des bénéfices – Secteur amont – Pesticides, engrais

D'après les estimations des représentants de la branche, environ 10 % des surfaces de maïs sont traitées aux *Trichogramma*. Cela signifie que dans 90 % des cas, ce moyen de lutte contre la pyrale du maïs n'est pas rentable. Dans les zones à races de pyrale bivoltines, les agriculteurs peuvent demander une autorisation spéciale pour épandre des insecticides.

Evaluation dans les scénarios A et B : 0

Si parmi les agriculteurs qui combattent la pyrale du maïs avec des *Trichogramma* (10 %), quelques-uns passent au Bt, la branche phytosanitaire ne constatera que des changements minimes de la demande.

Evaluation dans le scénario C : -1

Lorsqu'il faut combattre des races de pyrale bivoltines, la culture de maïs Bt permet potentiellement de réduire le recours aux insecticides.

Agribusiness – Bilan des bénéfices – Secteur aval – Flux de produits, préservation de l'identité

La séparation des flux de produits pour le maïs diffère selon le type de valorisation: ensilage ou grains. Lorsque le maïs récolté est utilisé pour l'ensilage, il est entreposé et transformé directement sur l'exploitation. Une petite partie sera commercialisée entre agriculteurs sous forme de balles de silos (Wüthrich et al., 2006). On admet qu'il n'y a pas de dépenses supplémentaires de séparation pour les agriculteurs sur leur propre exploitation. Par contre, pour la transformation du maïs grains, plusieurs acteurs participent à la chaîne de flux de produits : centres collecteurs, moulins à fourrage, points de vente, mais aussi moulins à aliments doivent prendre des mesures pour que le maïs Bt ne soit pas stocké et transformé avec le maïs conventionnel (Wühtrich et al., 2006). La dépense supplémentaire se situe non seulement au niveau du stockage (livraison, stockage intermédiaire, emballage), mais surtout à celui du processus de transformation. Comme actuellement le maïs et les céréales biologiques sont

déjà transformés dans des installations de production séparées, on peut penser qu'une séparation spatiale pour la transformation de maïs Bt soit également possible.

Evaluation dans les scénarios A et C : -2

La séparation des flux de produits entraîne beaucoup de travail et des coûts élevés pour tous les participants de la chaîne de création de valeur fourrage et aliments, mais en Suisse, il n'y a quasiment que les fabricants de mélange de fourrage qui seraient touchés.

Evaluation du scénario B : 0

Le maïs ne quitte pas l'exploitation sous forme de plante, car il est utilisé sur place comme fourrage. Il n'y a donc pas de dépenses pour la séparation des récoltes.

Agribusiness – Bilan des bénéfices – Secteur aval – Débouchés commerciaux

Les prescriptions d'étiquetage veillent à ce que la mention « génétiquement modifié » puisse être reconnaissable pour l'acheteur final. Toutefois, la compétitivité est fortement limitée par l'absence d'acceptation (et donc de marché). Pour que les OGM présentent un avantage pour le commerce de détail, (*i.e.* avec des marges plus élevées) cela nécessiterai des coûts de productions plus faibles ou la création d'un avantage pour le client. Dès lors, actuellement en Suisse, il n'y a pas de débouchés commerciaux car d'après les renseignements pris auprés de diverses organisations de consommateurs, la majorité des consommateurs suisses refusent les OGM. Toutefois, une expérience de vente en Suisse montre que ce refus ne serait pas définitif : une partie des consommateurs serait prête à acheter du pain de maïs OGM si le prix est compétitif (Aerni et al., 2011).

Evaluation dans les scénarios A et C : -1

Il ne faut pas s'attendre à une baisse des coûts de fabrication en Suisse liée à l'emploi de maïs Bt. On ne peut donc pas partir du principe que les produits seront meilleur marché pour l'acheteur final. Actuellement, l'acceptation des consommateurs est faible.

Evaluation du scénario B : 0

Le maïs Bt n'est pas mis en circulation mais valorisé sur l'exploitation. Comme il n'y a pas besoin de déclaration sur les produits animaux issus d'animaux affourragés avec des OGM, les débouchés ne changent pas.

Agribusiness – Bilan des bénéfices – Secteur aval – Impact sur l'approvisionnement

Une éventuelle amélioration de l'approvisionnement en produits agricoles par la culture d'OGM dépend de leur acceptation par les consommateurs. Le maïs utilisé pour l'alimentation humaine provient pratiquement à 100 % de l'étranger. Pour le maïs destiné à l'alimentation animale, les besoins sont couverts à 70 % par la production nationale (Wüthrich et al., 2006).

Si les consommateurs n'ont pas envie de maïs OGM, la culture de ce dernier ne modifie pas leur approvisionnement. Pour l'alimentation animale, où l'étiquetage du produit animal n'est pas obligatoire, il ne faut pas s'attendre à un changement s'il n'y a pas d'augmentation de rendement. En raison des coûts de séparation et du manque de demande, il se peut que les moulins à fourrage refusent de sécher et de transformer la matière première OGM ; il n'y aurait donc pas d'augmentation de la quantité de fourrage indigène de maïs. Quelle que soit l'utilisation du maïs, rien n'indique que le taux d'auto-approvisionnement puisse changer.

Evaluation dans tous les scénarios : 0

Agribusiness – Bilan des bénéfices – Secteur aval – Bureaux et entreprises de contrôle

La mise en œuvre de lignes de transformation séparées requiert un système de contrôle d'accompagnement. Les bureaux de contrôle offrent des prestations dont le prix dépend de l'ampleur et de la technique nécessaire : par exemple, un dépistage quantitatif d'OGM dans un aliment coûte env. CHF 200.- par échantillon, et dans le cas d'un échantillon positif, un examen détaillé entraîne des coûts supplémentaires importants (SCNAT, 2013). Sous un régime de coexistence, des frais d'analyse et de contrôle constituent 8 % des frais supplémentaires engendrés par la séparation (Moder et al., 2004). Les fournisseurs de la branche de contrôle et de certification vont donc augmenter leur chiffre d'affaires suivant le niveau d'exigence des règles de la coexistence.

Evaluation dans tous les scénarios : +1

Agribusiness – Structures socio-économiques – Garantie de la propriété et liberté économique

L'agribusiness et l'agriculture sont liés par la commercialisation de matières premières destinées à la transformation, les entreprises faisant connaître leurs préférences lors des négociations avec les agriculteurs (culture). Même si la demande de l'agribusiness détermine en partie la production agricole, les transformateurs dépendent majoritairement de l'offre en matière première. Si les OGM sont autorisés pour l'alimentation animale et/ou humaine, commerçants et transformateurs pourront aussi recourir aux importations.

Evaluation dans tous les scénarios : 0

Si du maïs Bt issu de la culture suisse est disponible, les entreprises disposeront d'un plus large éventail de choix (même si cela dépend finalement du nombre de variété au catalogue qui incluraient cette propriété). Toutefois, ils peuvent déjà y avoir accès aujourd'hui grâce aux importations.

Agribusiness – Structures socio-économiques – Effets sur les PME

En Suisse, beaucoup d'activités de l'agriculture, autant en aval qu'en amont des cultures, sont fournies par des PME. Si des OGM sont cultivés et intégrés dans les flux de produits, les centres collecteurs, les entrepreneurs sous-traitants, les moulins et bien d'autres encore seront fortement impliqués par les questions de séparation des produits. Les obligations de séparation des flux de produits sous réserve de faibles seuils de tolérances placent les entreprises devant de nouveaux défis : au niveau de l'emballage et de la transformation par exemple. Cela peut nuire à la compétitivité et porter atteinte aux relations existantes avec les partenaires commerciaux. En décidant d'intégrer ou non des OGM dans le processus de production, les PME prennent un risque entrepreneurial important.

Evaluation dans les scénarios A et C : -1

Des directives sévères de séparation des flux de produits augmentent les charges des PME. Une PME qui transforme des OGM pourrait être confrontée à des problèmes d'acceptation de la part de ses clients.

Evaluation du scénario B : 0

Comme la récolte est utilisée directement sur l'exploitation, il n'y a pas de produits OGM pour les PME dans le secteur aval. Il n'y a donc pas d'effets prévisibles pour les PME dans ce scénario.

Agribusiness – Structures socio-économiques – Image

En Suisse comme à l'étranger, les produits de l'agriculture suisse jouissent d'une excellente réputation. Elle est entre autres à mettre sur le compte de la qualité des produits, qui ne contiennent pas d'OGM pour le moment. Cette caractéristique est aussi spécifiée dans la Charte sur la stratégie qualité de l'agriculture et de la filière alimentaire suisse, signée par les unions paysannes, les associations de labels et les principaux commerçants de détail. Aux yeux de la branche, le renoncement à la technologie génétique offre d'importantes opportunités.

Evaluation dans tous les scénarios : -1

La valeur ajoutée de l'argument « non OGM » dans l'agriculture et la filière alimentaire suisses serait perdue de par la culture d'OGM.

Consommateurs – Liberté de choix

Pour offrir la liberté de choix aux consommateurs, il faut déclarer les caractéristiques spécifiques aux produits. L'interdiction de culture limite cette liberté de choix, tout comme un étiquetage lacunaire (Bonfadelli, 2010). Dans un système offrant la plus grande liberté de choix possible, les consommateurs pourraient décider de leurs achats d'après leurs propres expériences avec le produit (Aerni et al., 2011).

Evaluation dans les scénarios A et C : +1

Lorsque des produits issus de la culture d'OGM sont disponibles, il en résulte une plus grande liberté de choix des consommateurs (ici les acheteurs de denrées alimentaires et d'aliments pour animaux) qui peuvent prendre une décision sur le point de vente.

Evaluation du scénario B : 0

L'offre pour le consommateur ne s'élargit pas, car la récolte n'arrive pas sur le marché, et comme les produits animaux n'ont pas besoin d'être étiquetés, ils ne se distinguent pas des produits animaux issus de la production conventionnelle.

Consommateurs – Santé

Il n'existe pas de restrictions connues à la consommation de maïs Bt. Il faut cependant noter que de nombreuses toxines Bt sont disponibles sur le marché dont l'évaluation des risques est lacunaire : il s'agirait donc d'évaluer leur toxicité au cas par cas en l'absence de consensus scientifique clairement établi (Hilbeck et al.,2015). On notera également que l'usage répandu du maïs Bt a permis de limiter le taux de mycotoxines dans les récoltes (Meissle et al., 2010) (voir encadré).

Evaluation dans tous les scénarios : 0

Un strict contrôle de qualité existe en Suisse indépendamment de l'usage de biotechnologies.

Mycotoxines

Le lien entre infestation de pyrale du maïs et développement de mycotoxines a été observé. Dès lors, le maïs Bt permet indirectement de réduire la charge en mycotoxines dans les récoltes (Meissle et al., 2010). L'impact sur la santé n'est toutefois pas significatif sur le critère « santé » car la quantité de mycotoxines présente dans le lait et la viande suisses est considérée comme négligeable (Agroscope, 2014c). Cependant, l'impact des mycotoxines sur l'alimentation animale serait vraisemblablement réel bien que difficilement extrapolable en l'absence de données disponibles.

Consommateurs – Acceptation

L'expérience de vente d'Aerni et al. (2011) a montré que les consommateurs suisses achèteraient du pain produit avec du maïs génétiquement modifié. Le refus des consommateurs reste toutefois élevé (communication orale de SKS et FRC). L'enquête d'Eurobaromètre a aussi montré que les Suisses ne sont pas favorables aux OGM (65% d'opinion défavorable, rapport agricole 2015). La majorité des consommateurs ne voit aucun avantage dans les aliments génétiquement modifiés, ou les tient pour douteux voire même nocifs (Eurobaromètre, 2010a).

Evaluation dans les scénarios A et C : -1

Actuellement, l'acceptation des OGM par les consommateurs est faible.

Evaluation du scénario B : 0

Dans ce scénario, aucun produit portant le label « génétiquement modifié » n'arrive sur le marché.

Consommateurs – Niveau des prix

Le report des coûts de production et des coûts pour les mesures de séparation des flux fait monter le niveau des prix pour l'acheteur (p. ex. in Price et al., 2003). Les répercussions sur le prix dans le commerce de détail ne peuvent être estimées que grossièrement. D'après leurs statuts actuels, de nombreux programmes de labels excluent les OGM, ce qui fait qu'ils atteignent en moyenne un prix plus bas.

Evaluation dans les scénarios A et C : -1

Comme la séparation de flux de marchandises engendre des coûts élevés, on peut admettre qu'au moins une partie de ces coûts est répercutée sur les produits (OGM et sans OGM).

Evaluation du scénario B : 0

Comme l'alimentation des animaux de rente avec des OGM sur l'exploitation ne doit pas être déclarée, ni communiquée aux consommateurs, et qu'il n'y a pas de mesures de séparation des flux de produits dans le secteur aval, le prix ne change pas.

3.1.3.2 Critères environnementaux

Biodiversité – Conservation de la biodiversité – Espèces OEA

Evaluation dans les scénarios A et B : 0

Pour la culture de maïs Bt, on évalue surtout les effets possibles sur les espèces de lépidoptères (pyrale du maïs mais aussi plus généralement papillons), parce que la toxicité spécifique de la protéine Cry1Ab exclut tout effet sur les autres espèces. La protéine Cry1Ab a une toxicité différente suivant les espèces de lépidoptères lors de tests en laboratoires (Frankenhuyzen, 2009). Les espèces de papillons non-cibles peuvent entrer en contact avec la toxine en ingérant du pollen de maïs Bt. Pour 75 des 159 espèces de papillons énumérées dans le rapport « Opérationnalisation des objectifs environnementaux pour l'agriculture » (Walter et al., 2013), il a pu être observé une coïncidence des vols de pollen de maïs Bt avec des imagos et/ou des larves (Felke et Langenbruch 2005, Musche et al., 2009, Lang et al.,

2005, Traxler et al., 2005, Schmitz et al., 2003). Pour les 53 autres espèces OEA, il n'a pas été trouvé de données sur une exposition possible. Dans une modélisation, les quantités de pollen relevées dans les champs de maïs et à leurs alentours sont considérées comme insuffisantes pour avoir une influence négative sur les populations de papillons, même s'il s'agit d'espèces très sensibles (Perry et al., 2010).

Dans la culture de maïs Bt, il n'y a pas d'épandage de guêpes parasitoïdes *Trichogramma*. Ces guêpes lâchées dans le maïs conventionnel parasitent non seulement la pyrale du maïs, mais aussi d'autres espèces de lépidoptères, dont celles qui sont considérées comme menacées en Suisse (Babendreier et al., 2003a). Il a pourtant pu être démontré que le risque encouru par les populations de papillons du fait de la lutte biologique dans les champs à l'aide de *Trichogramma* reste faible (Babendreier et al., 2003b).

Les populations de lépidoptères non-cible ne seraient *a priori* ni compromises par le recours aux *Trichogramma* ni par la présence de toxines Bt dans le maïs.

Evaluation du scénario C : 0

Comme pour les scénarios A et B, on admet que la quantité de pollen de maïs Bt trouvé dans les champs de maïs et à leurs alentours ne suffit pas pour nuire à une proportion significative de la population d'espèces sensibles de lépidoptères non-cible.

Dans le scénario C, il est appliqué exceptionnellement l'un des deux insecticides Steward (substance active Indoxacarb) ou Audienz (substance active Spinosad). Les substances actives Spinosad et indoxacarb ont des niveaux de toxicités variés (chronique et aigües) pour un certain nombre d'espèces d'oiseaux, de reptiles, mammifères et probablement amphibiens et poissons (Sánchez-Bayo, 2011). Cette application n'a pas lieu dans la culture de maïs Bt.

Pour l'Indoxacarb, il n'y a pas d'effets négatifs connus sur les plantes cultivées (Moncada, 2003). Une utilisation correcte de ces produits permet de minimiser l'exposition et de limiter tout dégât au niveau des populations. Ainsi, la culture de maïs Bt et l'éventuel renoncement aux insecticide que cela entraîne n'avantagent ni ne nuisent aux espèces OEA.

Biodiversité – Conservation de la biodiversité – Flux génétique sur des plantes sauvages apparentées et invasivité dans les habitats naturels

Evaluation dans tous les scénarios : 0

En Europe, il n'existe pas de plantes sauvages apparentées au maïs, ce qui fait qu'il n'y a aucune possibilité de flux génétique sur des plantes sauvages (Sweet et Bartsch, 2012). En outre, le maïs Bt n'est pas plus invasif que le maïs conventionnel. Les plantes de maïs ont besoin d'une préparation du sol et ne peuvent que difficilement survivre hors d'un champ, dans des habitats naturels. Pas de flux génétique ne seraient donc observables.

Biodiversité – Fonctions écosystémiques – Pollinisateurs

Evaluation dans les scénarios A et B : 0

La toxine Cry1Ab n'est pas toxique pour les abeilles et les autres pollinisateurs comme les bourdons, et ne présente aucun effet négatif sur le développement des larves de ces espèces (Duan et al., 2008, Malone & Burgess, 2009) ni d'effets significatifs sur le comportement des abeilles mellifères dans la recherche de nourriture, sur leur poids et sur la performance de la colonie (Rose et al., 2007). D'après l'état actuel des connaissances, des incidences sur les insectes pollinisateurs par le lâcher de guêpes parasitoïdes *Trichogramma* peuvent être exclues. En ce qui concerne la fonction écosystémique pollinisation, la culture de maïs Bt est considérée comme équivalente à celle de maïs conventionnel.

Evaluation dans le scénario C : 0

Les substances actives Spinosad et Indoxacarb présentent une toxicité aiguë élevée pour les abeilles mellifères (Biondi et al., 2012). Des études en plein champs ont montrés que si on respecte les bonnes pratiques agricoles (épandage du produit en-dehors des vols de pollinisateurs), il n'y avait pas d'effets négatifs sur les bourdons et leur fonction pollinisatrice (Biondi et al., 2012). On admet que dans le scénario C le recours exceptionnel à ces insecticides, effectué selon les bonnes pratiques agricoles, n'a pas d'effets négatifs sur les insectes pollinisateurs.

Biodiversité – Fonctions écosystémiques – Lutte antiparasitaire naturelle

Evaluation dans les scénarios A et B : 0

Une méta-analyse d'études en plein champ a permis de conclure que la culture de maïs Bt n'entraîne pas de modification significative dans les populations des arthropodes qui participent au contrôle naturel des organismes nuisibles (Comas et al., 2013). Une autre méta-analyse a montré que la coccinelle maculée (*Coleomegilla maculata*), prédateur généraliste de divers pucerons, apparaît plus souvent sur les plantes de maïs Bt que sur le maïs conventionnel, alors que la fréquence de divers autres genres de prédateurs (comme *Orius, Geocoris, Hippodamia, Chrysoperla*) ne montre aucune différence (Wolfenbarger et al., 2008). Le parasitoïde spécialisé sur la pyrale du maïs *Macrocentris grandii* est moins fréquent dans les champs de maïs Bt, mais il n'a pas été constaté d'effet significatif sur la fréquence d'autres parasitoïdes (Naranjo, 2009).

Le lâcher de *Trichogramma* dans les champs de maïs conventionnel n'a pas d'effets sur les populations des diverses espèces participant à la lutte naturelle contre les organismes nuisibles (Babendreier et al., 2003c). L'effet du maïs Bt sur *M. grandii* est considéré comme négligeable, car un parasitoïde spécialisé sur un insecte nuisible est limité la plupart du temps par un contrôle efficace de son hôte. Pour le critère « Lutte antiparasitaire naturelle », la culture de Bt est donc jugée équivalente à celle du maïs conventionnel.

Evaluation du scénario C : +1

Si l'on compare la culture de maïs Bt avec celle de maïs conventionnel dans lequel des insecticides ont été épandus, on trouve en général un effet positif en ce qui concerne la fréquence de prédateurs et parasitoïdes dans les champs de maïs Bt (Wolfenbarger et al., 2008). Le spinosad est nocif aussi bien pour l'acarien prédateur *Typhlodromus pyri* que pour la guêpe braconide *Aphidius rhopalosiphi* alors que l'indoxacarb est modérément nocif pour *T. pyri* et *A. colemani*. Le spinosad peut nuire aux parasitoïdes alors qu'il est peu dangereux pour divers insectes prédateurs (Williams et al., 2003). Les parasitoïdes d'hyménoptères sont perturbés par le recours au spinosad dans la culture de maïs traditionnel et les acariens prédateurs subissent déjà des dégâts par contact avec des résidus de spinosad (Biondi et al., 2012). La substance active indoxacarb peut perturber les guêpes parasitoïdes, alors qu'il est considéré comme sûr pour les acariens prédateurs (Dinter & Wiles 2000).

En ce qui concerne le critère « Lutte antiparasitaire naturelle », la culture de maïs Bt est considérée comme légèrement supérieure à celle de maïs conventionnel avec application exceptionnelle d'insecticides.

Biodiversité – Fonctions écosystémiques – Fonctions dans l'écosystème sol

Evaluation dans les scénarios A et B : 0

La culture de maïs Bt n'a en général pas ou peu d'effets sur les organismes importants pour l'écosystème sol (Icoz et Stotzky, 2007). La protéine Cry1Ab n'est pas toxique pour beaucoup de ces organismes (vers de terre, cloportes, collemboles et acariens du sol). En laboratoire, il a parfois été trouvé des effets négatifs sur les nématodes. Toutefois, autant les essais en plein champ que sous serre sont arrivés à la conclusion que les effets observés dans les communautés de nématodes ou de bactéries exposées aux toxines Bt sont faibles et moins importants que d'autres facteurs physiologiques (type de sol, âge des plantes, etc.).

Des études de laboratoire ont montré qu'une croissance significativement inférieure d'hyphes présymbiotiques de champignons (mycorhizes) a lieu dans le sol planté de maïs Bt (Turrini et al., 2004). Cependant, ces résultats n'ont pu être confirmés par des expériences en plein champ : il n'y a pas été trouvé de différence dans la colonisation des plantes par des mycorhizes entre les plantes de maïs Bt et celles de maïs conventionnel (Cheeke et al., 2013, Zheng et al. 2015). En résumé, il n'a pas été trouvé d'effet important sur les organismes exerçant une fonction dans l'écosystème sol. Le critère *Fonctions dans l'écosystème sol* est donc considéré pour le maïs Bt comme équivalent au maïs conventionnel.

Evaluation du scénario C : 0

Les substances actives spinosad et indoxacarb ont toutes deux des effets toxiques aigus et chroniques modérés pour les vers de terre mais n'influencent pas la minéralisation de l'azote et du carbone réalisée dans le sol par les microorganismes. La densité de population de certains vers de terre et collemboles dans un sol de culture de maïs Bt et un sol de maïs conventionnel traité aux insecticides ne montre pas de différence significative (Icoz et Stotzky, 2007). Le spinosad n'a pas d'effet sur la colonisation et la diversité des champignons mycorhiziens arbusculaires (Ipsilantis et al., 2012). Les

effets des deux insecticides sur les fonctions dans l'écosystème sol sont cependant difficiles à évaluer. Comme pour le critère pollinisation, on peut admettre qu'une application exceptionnelle n'a pas d'effet négatif significatif sur les organismes et sur leur fonction dans l'écosystème sol. De ce point de vue, la culture de maïs Bt est considérée comme équivalente à celle de maïs conventionnel pour ce critère.

La faible pression sur la ressource sol due à la réduction des quantités de substances actives dans la culture de maïs Bt est prise en compte dans le critère *Qualité environnementale*.

Biodiversité – Fonctions écosystémiques – Fonctions dans l'écosystème eau

Evaluation dans les scénarios A et B : 0

Les organismes aquatiques peuvent entrer en contact avec la toxine Cry1Ab par ingestion de pollen ou d'autres parties de plantes (après la récolte). Une modélisation dans le cadre d'une analyse des risques pour l'environnement a montré que dans 99 % des cas d'éventuelle exposition des arthropodes aquatiques à la toxine Cry1Ab, il est pratiquement certain qu'aucun effet plus important que celui observé chez les lépidoptères n'est observable (Wolt et Peterson 2010). Cette étude estime également minime l'effet de la toxine Cry1Ab pour les espèces apparentées (libellules, moustiques, crustacés ou puces d'eau). D'autres études de toxicité ne montrent aucune toxicité sur les poissons et invertébrés par la toxine Cry1Ab (EPA, 2010). En supposant que l'application de guêpes parasitoïdes *Trichogramma* dans la culture de maïs traditionnel n'a pas d'effets sur les espèces ayant une fonction dans l'écosystème eau, la culture de maïs Bt est considérée pour ce critère comme équivalente à celle du maïs conventionnel.

Evaluation du scénario C : 0

L'application des insecticides indoxacarb et spinosad n'a pas lieu dans la culture de maïs Bt. Les deux substances ont un effet toxique aigu modéré sur les poissons, les invertébrés aquatiques et les algues. Le spinosad présente un effet toxique aigu élevé pour les organismes vivant dans les sédiments et faible pour les plantes aquatiques et l'indoxacarb a un effet toxique aigu modéré sur les plantes aquatiques. Bien que les deux substances soient toxiques pour certains organismes aquatiques, on admet que ceux-ci sont soumis aux obligations en vigueur pour l'application de produits phytosanitaires (PSMV, 2010) et qu'une application exceptionnelle de l'un des deux insecticides dans le scénario C n'entraîne pas ou peu de dégâts sur les organismes et leurs fonctions dans l'écosystème eau.
La faible pression sur la ressource eau par la diminution des quantités de substances actives répandues dans la culture de maïs Bt est prise en compte dans la *Qualité environnementale*.

Qualité environnementale – Atmosphère – Gaz à effet de serre – Dioxyde de carbone

Evaluation du scénario A : -1

La consommation de carburant ne change pas pour la culture de maïs Bt, car il n'y a de changement ni dans l'épandage de pesticides et d'engrais, ni dans la préparation du sol. Le lâcher de *Trichogramma* se fait à la main et ne génère pas de consommation de carburant supplémentaire dans la culture de maïs conventionnel. Comme on part de l'hypothèse que dans le Secteur aval, les trajets d'acheminement sont parfois plus longs parce que les produits modifiés ne sont pas acceptés par tous les preneurs (Albisser Vögeli et al., 2011), la consommation de carburant totale augmente et donc également les émissions de dioxyde de carbone.

Evaluation du scénario B : 0

La consommation de carburant ne change pas pour la culture de maïs Bt. Le lâcher de *Trichogramma* se fait à la main et ne génère pas de consommation de carburant supplémentaire dans la culture de maïs conventionnel. Dans le scénario B, contrairement au scénario A, le maïs est valorisé directement sur l'exploitation après la récolte. De ce fait, ni la consommation de carburant ni les émissions de dioxyde de carbone ne changent pour la culture de maïs Bt.

Evaluation du scénario C : 0

Comme pour le scénario A, dans le scénario C, on admet que les trajets d'acheminement dans le secteur aval sont plus longs. Dans le scénario C, pour la culture de maïs conventionnel, la pyrale du maïs est combattue à l'aide de pesticides, ce qui entraîne une augmentation de la consommation de carburant. Les deux effets sont opposés et impossibles à quantifier. En conséquence, on estime que la culture du Bt et celle du maïs conventionnel sont équivalentes en ce qui concerne les émissions de dioxyde de carbone.

Qualité environnementale – Air – Polluants atmosphériques – Oxydes d'azote
Comme pour le dioxyde de carbone.
Evaluation du scénario A : -1
Evaluation du scénario B : 0
Evaluation du scénario C : 0

Qualité environnementale – Air – Polluants atmosphériques – Suie de diesel
Comme pour le dioxyde de carbone.
Evaluation du scénario A : -1
Evaluation du scénario B : 0
Evaluation du scénario C : 0

Qualité environnementale – Eau – Run-offs Engrais
Evaluation dans tous les scénarios : 0

Par rapport à la culture de maïs conventionnel, la culture de maïs Bt n'a pas d'influence sur la quantité d'engrais nécessaire, et donc aucune influence sur la pollution des eaux pouvant provenir des engrais.

Qualité environnementale – Eau – Run-offs Pesticides
Evaluation dans les scénarios A et B : 0

La lutte contre la pyrale du maïs à l'aide de *Trichogramma* n'a pas lieu dans la culture de maïs Bt. Toutes les autres mesures phytosanitaires restent inchangées.
Evaluation du scénario C : +1

Dans le scénario C, on pulvérise des insecticides qui peuvent être toxiques pour certains organismes aquatiques. Les deux substances actives utilisées ont un effet toxique aigu modéré sur les poissons, les invertébrés aquatiques et les algues. Le spinosad présente une forte toxicité aiguë pour les organismes vivant dans les sédiments et léger pour les plantes aquatiques.

Ces insecticides ne sont pas répandus dans la culture de maïs Bt, ce qui ménage plus les organismes aquatiques. Le maïs Bt est donc considéré comme légèrement supérieur au maïs conventionnel.

Qualité environnementale – Sol – Charge physique – Erosion
Evaluation dans tous les scénarios : 0

Par rapport à la culture de maïs conventionnel, la culture de maïs Bt n'a pas d'influence sur le travail du sol et n'a donc aucun impact sur l'érosion qui peut en résulter.

Qualité environnementale – Sol – Charge physique – Compactage
Evaluation dans les scénarios A et B : 0

Par rapport à la culture de maïs conventionnel, la culture de maïs Bt n'a pas d'influence sur le nombre de passages dans les champs et donc aucune influence sur le compactage du sol qui peut en résulter.
Evaluation du scénario C : +1

Dans le scénario C, on pulvérise des insecticides. La culture du maïs Bt entraîne une réduction du nombre de passages dans les champs, donc une réduction du compactage du sol qui peut résulter du passage des machines.

Qualité environnementale – Sol – Pollution chimique – Engrais
Evaluation dans tous les scénarios : 0
Par rapport à la culture de maïs conventionnel, la culture de maïs Bt n'a pas d'influence sur la quantité d'engrais nécessaire et donc aucune influence sur la contamination des sols qui peut en résulter.

Qualité environnementale – Sol – Pollution chimique – Pesticides
Evaluation dans les scénarios A et B : 0

La lutte contre la pyrale du maïs avec les guêpes parasitoïdes *Trichogramma* n'a pas lieu dans la culture du maïs Bt. Toutes les autres mesures phytosanitaires restent inchangées.
Evaluation du scénario C : +1

Dans le scénario C, on pulvérise des insecticides qui peuvent être modérément toxiques, p. ex. pour les vers de terre. Par rapport à la culture de maïs conventionnel traité aux insecticides, la culture de maïs Bt entraîne une réduction des applications d'insecticides et a donc une influence positive sur la pollution des sols causée par ces produits. La culture de maïs Bt est donc jugée légèrement supérieure.

Besoins en ressources – Eau

Evaluation dans tous les scénarios : 0

Par rapport à la culture de maïs conventionnel, la culture de maïs Bt n'a pas d'influence sur la consommation d'eau dans les champs.

Besoins en ressources – Energie

Comme pour le dioxyde de carbone.

Evaluation du scénario A : -1

Evaluation du scénario B : 0

Evaluation du scénario C : 0

Besoins en ressources – Terrain

Evaluation dans les scénarios A et B : 0

Dans les scénarios A et B, on prend pour hypothèse de départ une faible attaque de pyrale du maïs, qui peut être combattue à l'aide de *Trichogramma* dans le maïs conventionnel sans perte de récolte significative. Comme pour le critère Rendement, les besoins en ressource terrain sont considérés comme équivalents pour la culture de maïs Bt et pour celle de maïs conventionnel.

Evaluation du scénario C : +1

Dans la culture de maïs conventionnel, des pertes de récolte sont attendues en cas d'attaque d'une race bivoltine de pyrale du maïs. Le maïs Bt au contraire ne subit pas de perte de récolte suite à ce genre d'attaque. Comme pour le critère *Rendement*, le critère *Terrain* est considéré comme légèrement supérieur pour la culture de maïs Bt, car la productivité par unité de surface est meilleure.

Besoins en ressources – Pesticides

Evaluation dans les scénarios A et B : +1

Dans les scénarios A et B, la lutte contre la pyrale du maïs avec les guêpes parasitoïdes *Trichogramma* n'a pas lieu dans la culture du maïs Bt. Toutes les autres mesures phytosanitaires restent inchangées. Par rapport à la culture de maïs conventionnel, la culture de maïs Bt entraîne une baisse des besoins en pesticides et est donc jugée légèrement supérieure.

Evaluation du scénario C : +1

La lutte contre la pyrale du maïs à l'aide d'insecticides n'a pas lieu dans la culture de maïs Bt. Toutes les autres mesures phytosanitaires restent inchangées.

Par rapport à la culture conventionnelle, la culture de maïs Bt entraîne une baisse des besoins en pesticides et est donc jugée légèrement supérieure.

Besoins en ressources – Engrais

Evaluation dans tous les scénarios : 0

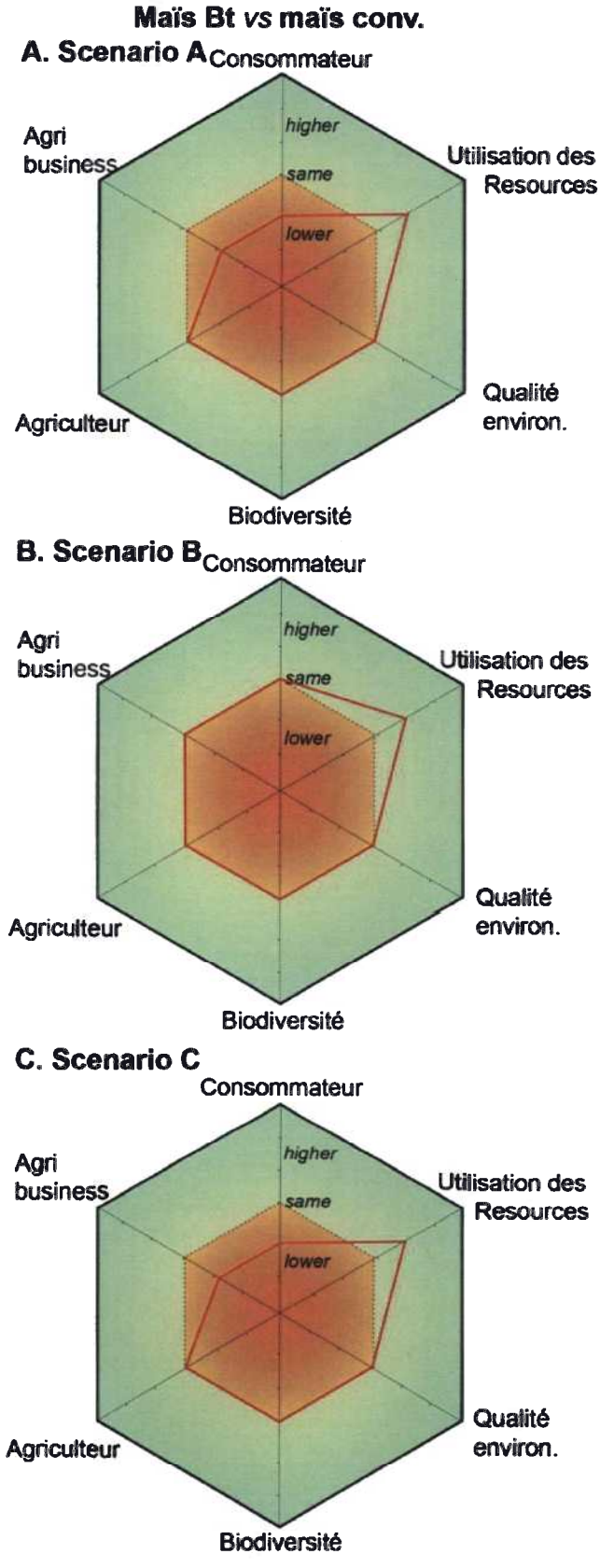
Par rapport à la culture conventionnelle, la culture de maïs Bt n'a pas d'influence sur la quantité d'engrais utilisée.

3.1.4 Synthèse de l'analyse de durabilité pour le maïs Bt

L'évaluation ADMC de l'influence du maïs Bt pour les trois scénarios présentés ici montre globalement un faible impact sur la durabilité globale (Figure 4). Dans deux des trois scénarios, la culture de maïs Bt a une influence négative sur l'agriculteur et l'agribusiness (scénario A et C) ou pas d'impact significatif (scénario B). D'un point de vue environnemental, la substitution d'insecticides (utilisés exclusivement sous dérogations en cas d'infections de pyrales bivoltines) montre un impact positif dans les trois scénarios. C'est d'ailleurs la substitution des insecticides de synthèse utilisés dans la culture conventionnelle qui donne à la culture de maïs Bt un léger avantage (scénario C, figure 4). Dans aucun des scénarios, la culture du maïs Bt n'a d'effet sur les besoins en eau et en engrais. Les besoins supplémentaires en diesel liés aux émissions sont associés aux mesures de coexistence.

Il est important de noter que la rentabilité du maïs Bt est liée en grande partie à son acceptation (voire l'étude de sensibilité dans la section suivante). La valorisation du maïs *in situ* sur l'exploitation même engendre plus de bénéfices socio-économiques. Il est néanmoins important de souligner l'ambivalence d'une culture dont les intrants sont plus chers (premium sur les semences particulièrement), mais qui serait destinée à des marchés à relativement faible valeur ajoutée (pas de labélisation possible, faible acceptation). L'impact des mesures de coexistence et leurs surcoûts sont relativement difficiles à évaluer avec précision mais globalement négatifs. On note aussi que l'évolution de résistances chez la pyrale est bien documentée et nécessiterai une étude plus précise quant à la durabilité dans le temps de cette résistance en Suisse et l'impact des stratégies possibles pour y faire face : utilisation de multiples toxines Bt, zones marginales tampons autour des champs. Les bénéfices en termes de flexibilisation des itinéraires techniques restent faibles pour des exploitations à surface relativement faibles. Pour les consommateurs suisses, le maïs Bt n'apporte pas d'avantages particuliers, et ce indépendamment du bas niveau actuel d'acceptation de cette technologie.

Figure 4. Evaluation du maïs Bt. A. scénario A, B. scénario B, C. scénario C.



3.2 Betterave à sucre tolérante aux herbicides (HT)

3.2.1 Introduction

La betterave à sucre est une culture très susceptible aux adventices. Les betteraves à sucre ne supportent pas la concurrence de la mauvaise herbe jusqu'à la fermeture des rangs. En Suisse, les adventices sont combattues presque exclusivement à l'aide d'herbicides. Or il n'existe aucun herbicide capable de combattre efficacement les mauvaises herbes sans endommager les betteraves (Liebegg, 2012). En culture conventionnelle, les betteraves sont traitées à trois reprises avec une combinaison de substances actives qui doit être adaptée suivant les espèces envahissantes, la météo et la nature du sol (SFZ, 2013a). Pour leur transformation, les betteraves à sucre sont acheminées dans les deux raffineries des Sucreries Aarberg et Frauenfeld SA (SAF), où elles sont transformées en sucre. La pulpe de betterave et la mélasse sont des sous-produits de ce processus, lesquels sont surtout utilisées pour l'alimentation des vaches laitières et pour l'engraissement du gros bétail.

Nous évaluerons ici une betterave à sucre tolérante à l'herbicide (HT) glyphosate. Par exemple, la variété H7-1, développée par Monsanto et KWS exprime une variante de la 5-énolpyruvylshikimate-3-phosphate synthase (CP4-ESPS) qui procure une tolérance à l'herbicide glyphosate. La majeure partie des surfaces cultivées à ce jour avec des OGM sont occupées par des plantes présentant cette caractéristique (SCNAT, 2013). La culture de la betterave à sucre H7-1 est autorisée au Canada, au Japon et aux USA (CERA, 2010). Aux USA, 95 % des betteraves à sucre cultivées portent la caractéristique H7-1. Dans l'Union Européenne, la betterave à sucre H7-1 est autorisée depuis 2007 comme denrée alimentaire et aliments pour animaux. De nombreux projets du programme national PNR59 ont analysés les plantes tolérantes aux herbicides dont la betterave (Albisser et al., 2012, Speiser et al., 2013). Au-delà des problèmes liés à la transgénèse que l'on va évoquer ici, la résistance aux herbicides est une caractéristique agronomique déjà largement utilisée dans les champs qui posent des problèmes de gestion spécifiques (Beckert et al., 2011).

3.2.2 Scénarios

Scénario A

*Culture de betterave à sucre tolérante aux herbicides par **pression modérée** des adventices, avec désherbage par herbicides.*

Dans la culture conventionnelle de betterave à sucre, pour lutter contre les mauvaises herbes, on utilise des mélanges semi-finis des substances actives: phenmédiphame, ethofumésate, desmédiphame et métamitron, en traitement fractionné en trois applications. Cependant, pour la culture de betterave à sucre HT, on utilise l'herbicide total glyphosate en deux applications (Tableau 6). Ces scénarios ont été repris à partir de Nichterlein (Nichterlein et al., 2013) et adaptés aux substances actives disponibles en Suisse.

Dans le scénario A, les hypothèses de départ sont les suivantes : par rapport aux variétés conventionnelles, la culture de la betterave à sucre HT n'occasionne aucun autre changement dans le mode de culture (travail du sol, engrais, contrôle mècanique des mauvaises herbes) hormis le désherbage chimique. La transformation de la betterave à sucre HT se fait à des moments différents de celle de la betterave à sucre conventionnelle, à l'image de ce qui se fait pour la betterave à sucre produite biologiquement (d'abord bio, puis conventionnel, puis HT). Le nettoyage final des installations de production après la fin de la campagne est efficace et suffisant pour pouvoir, l'année suivante, transformer les betteraves à sucre bio sans risque de contamination. Une partie du contingent de betteraves à sucre dans l'Accord interprofessionnel est attribuée aux betteraves à sucre génétiquement modifiées.

Tableau 6. Applications d'herbicides dans la culture de betterave à sucre pour le scénario A

Système de culture	Produit	Passages, dosage (l, kg / ha)	Quantité de substance active (g / l, kg)	Coformulants	Quantité de substance active (kg / ha)	Prix du produit (CHF/ l, kg)	Prix (quantité totale) CHF
Conv.	Beta Team	3 x 1.0	75 Phenmédiphame 150 Éthofumésate 25 Desmédiphame	non connu	0.75	41.8	125.4[4]
	Sugaro Gamma	3 x 1.5	700 Metamitron	non connu	3.15	53.7	241.5[5]
	Total :				**3.9**		**366.9**
OGM	Glifonex	2 x 3.0	360 Glyphosate	Polyoxyéthylène amine (POEA)	2.16	9	54.1[6]
	Total :				**2.16**		**54.1**

Scénario B

*Culture de betterave à sucre tolérante aux herbicides par **forte pression** de mauvaises herbes*

Dans le scénario B, on prend pour hypothèse une forte pression des mauvaises herbes. Dans la culture conventionnelle, en plus de la technique de lutte définie dans le scénario A, on ajoute du chloridazone, du diméthénamide et du triflusulfuron-méthyle en traitement fractionné pour lutter contre les adventices problématiques (entre autres l'éthuse ciguë, le tournesol, le millet, la camomille, Tableau 7). Ce scénario a été repris et adapté à partir de Nichterlein (Nichterlein et al., 2013). Pour la culture de betterave à sucre tolérante aux herbicides, la stratégie reste la même que pour le scénario A, avec deux applications de glyphosate.

On note que dans le scénario B, on admet que les substances actives chloridazone, diméthénamide et triflusulfuron-méthyle peuvent être ajoutées dans le mélange (Beta Team et Sugaro Gamma) et qu'il n'est pas nécessaire de faire des mélanges et des passages séparés.

Tableau 7. Applications d'herbicides dans la culture de betterave à sucre dans le scénario B.

Système de culture	Produit	Passages, dosage (l, kg / ha)	Quantité de substance active (g / l, kg)	Coformulants	Quantité de substance active (kg / ha)	Prix du produit (CHF/l, kg)	Prix (quantité totale) CHF
Conv.	Beta Team	1 x 1.0 2 x 1.2	75 Phenmédiphame 150 Éthofumésate 25 Desmédiphame	non connu	0.85	41.8	142.1
	Sugaro Gamma	1 x 1.0 2 x 1.5	700 Métamitron	non connu	2.8	53.7	214.6

[4] Schneiter AGRO AG
[5] Groupe fenaco-LANDI
[6] Leu+Gygax AG, consultable sous : http://www.leugygax.ch/inhalt_d/produkte_detail.php?id=63

	Pyra-min DF	1 x 0.55	650 Chlorida-zone	Di-Isobu-tylnaphta-lènesulfo-nate de sodium	0.36	53.6	29.5[7]
	Frontier X2	1 x 0.3 1 x 0.45	720 Diméthéna-mide	Solvant Naphte	0.54	55.8	41.9[8]
	Debut	2 x 0.02	500 Triflusulfu-ron-méthyle	non connu	0.02	1500	60[9]
	Total :				**4.57**		**488.1**
OGM	Gli-fonex	2 x 3.0	360 Glyphosate	Polyoxyé-thylène amine (POEA)	2.16	9	54.1
	Total :				**2.16**		**54.1**

En outre, les hypothèses de départ suivantes s'appliquent pour les deux scénarios :

- Le recours au glyphosate est permis dans la culture de betterave à sucre.
- On admet que l'une des deux sucreries suisses prend en charge et transforme la betterave à sucre HT.
- Comme pour la culture conventionnelle, les travaux dans les champs et pour la récolte sont effectués en partie par des entreprises sous-traitantes (pas de nouvelles machines nécessaires).
- Pour pouvoir assurer la séparation des flux de produits dans la transformation, il est nécessaire de disposer de surfaces de stockage séparées dans la sucrerie car l'infrastructure actuelle de la fabrique ne permet pas véritablement de séparation. Une séparation spatiale est nécessaire pour entreposer les produits transformés et les sous-produits (mélasse, pulpe de betterave), ainsi que les betteraves non transformées.
- Le fait qu'une fabrique soit spécialisée dans une transformation particulière (le sucre biologique n'est par exemple produit qu'à Frauenfeld) peut entraîner des trajets plus longs suivant où se situe la culture OGM. On admet que la culture de betterave OGM se concentre initialement en majeure partie autour du site de transformation et qu'il n'en résulte pas de trajets plus longs du champ à la fabrique. Lorsque la betterave OGM n'est pas transformée dans la fabrique la plus proche, on admet qu'elle est transportée par train de la fabrique au site de transformation. On considère en conséquence qu'il n'y a pas de transport supplémentaire sur route, mais qu'il peut arriver que certaines quantités de betteraves doivent être déplacées d'une fabrique à l'autre.
- Le moment de l'application des pesticides diffère dans ce sens que la première application en culture conventionnelle a lieu plus tôt (stade cotylédons). Les deuxième et troisième applications en culture conventionnelle et les deux applications de glyphosate ont lieu plus ou moins au même moment (stade 2 feuilles et 6 feuilles de la betterave). Pour la betterave à sucre HT, la période d'application permet toutefois une plus grande flexibilité.

Apparitions d'espèces résistantes au glyphosate

Le développement possible de mauvaises herbes résistantes aux herbicides est un grand danger pour l'utilisation durable d'herbicides. On utilise des herbicides de synthèse pour le contrôle des adventices depuis la fin des années 40, et c'est en 1957 qu'il a été pour la première fois fait état d'une mauvaise herbe résistante aux herbicides (Hilton, 1957). Bien que des stratégies pour empêcher le développement de résistances et pour gérer les résistances existantes soient appliquées depuis lors, le nombre

[7] Leu+Gygax AG, consultable sous : http://www.leugygax.ch/inhalt_d/produkte_detail.php?id=106

[8] Leu+Gygax AG consultable sous : http://www.leugygax.ch/inhalt_d/produkte_detail.php?id=341&rubrik=&anwendungsgebiet=&kulturen=&name=frontier x2

[9] Groupe fenaco LANDI

de cas annoncés ne fait qu'augmenter, et il a été découvert des mauvaises herbes résistantes pour tous les principaux mécanismes actifs des herbicides (Délye et al., 2013). Actuellement (état mars 2014), on connaît 232 adventices résistantes aux herbicides de par le monde (137 dicotylédones et 95 monocotylédones) dont 44 résistantes au glyphosate (Heap, 2014, Green, 2014). En général, l'application répétée du même herbicide entraîne une forte pression de sélection pour les mauvaises herbes dans le champ, ce qui a pour résultat une forte probabilité de développement de résistances contre cet herbicide (Sweet et Bartsch, 2012). Pour limiter ce phénomène, diverses stratégies sont mises en œuvre : multiplications des substances actives, rotations culturales, utilisation de variétés populations. Toutes ces mesures étant nécessairement accompagnées d'un monitoring (HRAC, 2014). En Suisse, le glyphosate est utilisé dans les jardins privés, le long des voies de chemin de fer et pour l'entretien des routes (Strickhof, 2012b). Dans l'agriculture, les traitements au glyphosate avant la récolte sont défendus et ceux en pré-levée seulement autorisés en bandes.
Dans un vignoble vaudois qui avait été traité durant plus de quinze ans avec du glyphosate, on a trouvé en février 2014 le premier cas d'une mauvaise herbe résistante au glyphosate (Agroscope, 2014a). Les réglementations de rotation des cultures prescrites dans les directives PER ont été instaurées en particulier pour empêcher le développement de résistantes.

3.2.3 Evaluation de la durabilité

3.2.3.1 Critères socio-économiques

Agriculteur – Bilan des bénéfices – Valeur de la production – Rendement

Le rendement de la betterave à sucre est principalement lié à la pression des adventices mais aussi des conditions de semis, de l'état du sol et de la météo durant son développement. On note également que l'application d'herbicides (par définition phytotoxiques) peut également limiter la croissance de la betterave à sucre et qu'un important recours aux herbicides peut entraîner des pertes de rendement. La betterave à sucre HT n'entraîne pas de rendement supérieur par rapport aux variétés similaires ou presque isogènes (Wolf, 2009) mais plutôt une stabilisation de ces derniers en empêchant des pertes trop importantes. Au cours des 20 dernières années, le rendement de la betterave à sucre a pu être considérablement amélioré (ZAF, 2013).

Evaluation dans tous les scénarios : +1

Dans des essais en plein champ en Allemagne et en Pologne, la culture de betterave à sucre HT H7-1 affiche un rendement supérieur de 4 à 18 % par rapport à la betterave à sucre conventionnelle grâce à un contrôle efficace des adventices (Nichterlein et al., 2013). Plusieurs autres rapports citent une stabilisation des rendements voire des augmentations de l'ordre de 5% (Albisser Vögeli et al. 2011) ou 8.8% (Brookes et Barfoot, 2014).

Agriculteur – Bilan des bénéfices – Coûts variables – Prix

Le prix de vente pour la betterave à sucre est fixé dans l'accord interprofessionnel annuel. Il est fait à partir d'un prix indicatif et de divers éléments variables (teneur en sucre, rendement technique, impuretés, livraison précoce / tardive, indemnités de transport). La contribution à la surface représente une part importante du revenu de la culture de betterave à sucre ; on admet dans les hypothèses générales de départ que cette contribution est également allouée à la culture OGM. La prise en charge et la transformation de la betterave HT se ferait après celles de la betterave non OGM, ce qui requiert une nouvelle répartition des périodes donnant droit à des primes spécifiques.

Evaluation dans tous les scénarios : -1

Les agriculteurs reçoivent un prix plus bas pour un produit OGM si la caractéristique « non OGM » est considérée comme une plus-value. La fabrique de sucre peut exercer une pression sur le prix des matières premières en raison du surcoût généré.

Agriculteur – Bilan des bénéfices – Coûts variables – Coûts de production

Dans le cas de la culture de la betterave HT, les coûts de production changent au niveau des moyens d'exploitation et des intrants. L'augmentation du prix pour la semence OGM est estimée à 30 % (Albisser Vögeli et al., 2011). Les combinaisons de pesticides sont remplacées par des applications de l'herbicide total glyphosate, ce qui a une rend plus flexibles les périodes d'application. Il y a en outre une réduction

de trois à deux passages dans la culture de betterave OGM. Il faut prendre certaines mesures de coexistence malgré l'absence de floraison la première année de culture : pour empêcher le flux génétique sur des parcelles voisines de betterave à sucre, les pousses qui peuvent exceptionnellement aussi apparaître la première année doivent être éliminées (Albisser Vögeli et al., 2011). Cette pratique est déjà appliquée. Le Conseil fédéral a proposé dans son projet de coexistence de 2013 une distance d'isolement de 12 m (OFEV et OFAG, 2013).
Evaluation dans tous les scénarios : +1

Grâce à des économies dans le domaine des herbicides, la culture de betterave à sucre tolérante aux herbicides HT peut être jugée légèrement supérieure. Dans le scénario A, il y a 313 CHF d'économie par hectare pour la culture de betterave à sucre tolérante aux herbicides HT par rapport à la betterave à sucre conventionnelle, dans le scénario B, 434 CHF (Tableau 6 et 7).

Agriculteur – Bilan des bénéfices – Coûts variables – Charge de travail

La diminution du nombre d'application d'herbicides dans la culture HT diminue légèrement le temps de travail et permet plus de flexibilité. On considère que ce gain est compensée par la mise en place de mesures de coexistences (Albisser Vögeli et al., 2011 / Agridea, 2013a).
Evaluation dans tous les scénarios : 0

Agriculteur – Structures socio-économiques – Garantie de la propriété et liberté économique

Evaluation dans tous les scénarios : +1

Le degré de garantie de la propriété et de liberté économique est déterminé par les conditions prescrites pour la garantie de la coexistence. Celles-ci doivent être adaptées à l'utilisation des OGM et ne pas être restrictives (Demont et Devos, 2008). Le degré de garantie de la propriété et de la liberté économique augmente lorsque la culture d'une variété OGM est possible. L'autorisation des OGM permet aux agriculteurs de choisir parmi une gamme de systèmes de culture plus large, dans la mesure où la diversité des variétés au catalogue est maintenue (Hilbeck et al., 2013).

Agriculteur – Structures socio-économiques – Acceptation au niveau local

L'acceptation des OGM au niveau local est très délicate. Le sondage de Schweiger et Szerencsits (2009) parmi les agriculteurs de la région de Zurich montre que la disposition à cultiver des OGM dépend fortement d'un point déterminant : « l'exploitation présumée des voisins » ainsi que le régime de responsabilité civile lié à ce type de culture. Les SAF (Sucreries Aarberg et Frauenfeld) supposent que l'acceptation de la betterave HT serait problématique lors de la mise en commun des machines et du transport. La culture de betterave OGM dans une région affecterait donc les réseaux d'entraides sociaux et économiques.
Evaluation dans tous les scénarios : -1

On part de l'hypothèse que les agriculteurs qui aimeraient cultiver de la betterave HT devront trouver un consensus aussi bien avec l'acheteur, les transformateurs (SAF) qu'avec leurs voisins. L'hypothèse d'un « conflit potentiel » n'a pas pu être clairement réfutée lors des consultations avec la branche.

Agriculteur – Structures socio-économiques – Pratiques agricoles

L'itinéraire technique lié à l'utilisation de la betterave HT est plus flexible et moins lourd. Cet effet aura un effet particulier sur les grandes exploitations, qui supporteront également mieux les surcoûts liés à la coexistence (Speiser et al., 2013). Du point de vue des SAF, la grande popularité dont jouit la betterave à sucre HT aux USA est due à la flexibilité qui l'accompagne (SAF, 2013).
Evaluation dans tous les scénarios : -1

Dans certaines circonstances, comme par exemple en cas de développement d'herbes résistantes à certains herbicides, il est très important de bien connaître les différentes adventices et le spectre d'efficacité de ces herbicides. Cette expertise pourrait se perdre en cas de recours généralisé à un herbicide total.

Agribusiness – Bilan des bénéfices – Secteur amont – Capacité d'innovation

L'impact de l'autorisation de lignées HT en Suisse permettrait de diversifier les programmes de recherche appliqués et fondamentaux qui s'intéresse à la gestion des espèces invasives et autres adven-

tices des cultures. Il est très important d'accompagner une telle autorisation d'un programme de monitoring solide qui permettrait une efficacité optimale des propriétés amenées par le génie génétique. De tels programmes profiteraient à la Suisse comme place d'excellence agronomique.
Evaluation dans tous les scénarios : +1

Agribusiness – Bilan des bénéfices – Secteur amont – Consommations intermédiaire (semence)

Actuellement, il n'y a pas en Suisse de sélection de betterave à sucre ni de multiplication de semence de betterave à sucre (Liebegg, 2012). Les semences du catalogue des variétés suisses (SFZ, 2013b) proviennent de trois entreprises : Strube (Allemagne, 3 variétés), KWS (Allemagne, 5 variétés), Syngenta (Suisse, 2 variétés).
Evaluation dans tous les scénarios : 0

La possibilité de cultiver une betterave à sucre HT n'a pas d'effets sur le marché des semences si toutes les semences sont produites à l'étranger.

Agribusiness – Bilan des bénéfices – Secteur amont – Consommations intermédiaires *(pesticides, engrais)*

Les herbicides utilisés dans la culture conventionnelle de betterave à sucre sont remplacés par des produits à base de glyphosate, ce qui induit un transfert dans le chiffre d'affaires d'un produit à l'autre. D'après le rapport agricole 2012, la betterave à sucre est après les fruits et les pommes de terre la culture qui dépend le plus fortement des pesticides (mesuré d'après la quantité de substance active, OFAG, 2012). Dans nos scénarios, on utilise moins de substance active pour la betterave à sucre tolérante aux herbicides que pour la culture de betterave conventionnelle.
Evaluation dans tous les scénarios : -1

Dans la culture de betterave à sucre tolérante aux herbicides, on utilise moins de substances actives et en moins grande quantité, ce qui réduit le chiffre d'affaires du marché des produits phytosanitaires.

Agribusiness – Bilan des bénéfices – Secteur aval – Flux des produits, préservation de l'identité

D'après les données de l'industrie, le transport de la betterave à sucre se fait toujours collectivement, et donc en grandes quantités. Une séparation efficace demanderait de gros efforts matériels. Dans la sucrerie elle-même, les installations actuelles rendent une séparation difficile car il n'y a qu'une ligne de production (un seul bassin collecteur, manque de cellules de stockage séparée pour les produits...). En conséquence, la betterave à sucre OGM serait la dernière à être traitée et devrait être entreposée plus longtemps, ce qui peut entraîner des pertes. L'étiquetage du sucre est aussi problématique car il est impossible de distinguer les mélanges dans le produit final.
Evaluation dans tous les scénarios : -2

La prise en charge d'une ligne de production séparée s'avère problématique à l'heure actuelle sans surcoûts prohibitifs.

Agribusiness – Bilan des bénéfices – Secteur aval – Débouchés commerciaux
Evaluation dans tous les scénarios : -1

La structure monopolistique de la filière sucrière par les SAF en Suisse rend difficile la mise en place d'une nouvelle filière séparée. L'absence de marché réel (très difficile acceptation des traits HT par la population (SBV, 2013), la difficile traçabilité du sucre et de ses sous-produits ainsi que l'obligation légale d'étiquetage (ODAIGM, 2005) rendent les perspectives commerciales limitées pour les deux scénarios étudiés.

Agribusiness – Bilan des bénéfices – Secteur aval – Impact sur l'approvisionnement
Evaluation dans tous les scénarios : 0

En Suisse, on importe du sucre en plus de la production nationale. La production de sucre nationale est pilotée par l'interprofession « sucre ». L'absence d'augmentation significative du rendement n'influencerait vraisemblablement pas le taux d'auto-approvisionnement en sucre.

Agribusiness – Bilan des bénéfices – Secteur aval – Bureaux et entreprises de contrôle
Evaluation dans tous les scénarios : +1

La mise en œuvre de lignes de transformation séparées requiert un système de contrôle. Les bureaux de contrôle offrent des prestations dont le prix dépend de leur étendue et de la technique utilisée :

par exemple, un dépistage quantitatif d'OGM dans un aliment coûte env. CHF 200 par échantillon, et dans le cas d'un échantillon positif, un examen approfondi entraîne des coûts supplémentaires importants (SCNAT, 2013). Une étude estime que les frais d'analyse et de contrôle constituent 8 % des frais supplémentaires engendrés par la séparation (Moder et al., 2004). Les entreprises de contrôle et de certification vont donc augmenter leur chiffre d'affaires s'ils acquièrent de nouvelles tâches et de nouveaux clients.

Agribusiness – Structures socio-économiques – Garantie de la propriété et liberté économique

Evaluation dans tous les scénarios : 0

L'agribusiness et l'agriculture sont liés par la commercialisation de matières premières destinées à la transformation. Les entreprises en aval de la production font connaître leurs préférences lors des négociations avec les agriculteurs. Si les OGM sont autorisés pour l'alimentation animale et /ou humaine, commerçants et transformateurs pourront éventuellement les importer (s'ils sont autorisés également dans l'Union Européenne).

Agribusiness – Structures socio-économiques – Effets sur les PME

Evaluation dans tous les scénarios : -1

Dans la chaîne de production de valeur ajoutée du sucre de betterave, il n'y a quasiment pas de PME au niveau du processus de production aboutissant au sucre. Les seules entreprises de production de sucre sont les SAF et le moulin à sucre de Rupperswil, qui produit du sucre de betteraves provenant de Suisse, de France et d'Allemagne, ainsi que du sucre brut. Le moulin à sucre de Rupperswil compte par exemple McDonalds parmi ses clients.

Par contre, il y a beaucoup de PME actives dans la transformation de sucre en aval dans la chaîne, au niveau des boulangeries ou des fabricants de sucreries. La culture d'OGM aura des effets économiques à ce niveau lorsqu'il s'agira pour ces entreprises de décider si elles veulent mettre en place une séparation de la marchandise OGM et non OGM, ou si elles veulent se limiter à une seule catégorie. Il est possible que cette coexistence entraîne des difficultés ou des dépenses élevées pour certaines entreprises.

Agribusiness – Structures socio-économiques – Image

En Suisse comme à l'étranger, les produits de l'agriculture suisse jouissent d'une excellente réputation. Elle est entre autres à mettre sur le compte de la qualité des produits, qui ne contiennent pas d'OGM pour le moment. Cette caractéristique est aussi spécifiée dans la Charte sur la stratégie qualité de l'agriculture et de la filière alimentaire suisse, signée par les unions paysannes, les associations de labels et les principaux commerçants de détail. Aux yeux de la branche, le renoncement à la technologie génétique offre d'importantes opportunités.

Evaluation dans tous les scénarios : -2

La valeur ajoutée engendrée par le renoncement aux OGM dans l'agriculture et la filière alimentaire suisses serait perdue de par la culture d'OGM en Suisse. De plus, la propriété « tolérance aux herbicides » est associée à une image négative chez les consommateurs.

Consommateurs – Liberté de choix

Pour offrir la liberté de choix aux consommateurs, il faut déclarer les caractéristiques spécifiques à chacun des produits commercialisés. L'interdiction de la culture d'OGM est considérée comme limitant cette liberté de choix (Bonfadelli, 2010).

Evaluation dans tous les scénarios : +1

Lorsque des produits issus de la culture d'OGM sont disponibles, il en résulte une plus grande liberté de choix des consommateurs, qui peuvent prendre une décision au moment de l'achat.

Consommateurs – Santé

Dans la culture de betterave à sucre tolérante aux herbicides, on emploie un herbicide total à base de glyphosate en combinaison avec des coformulants parfois également toxiques (BfR, 2013, Mesnage et al., 2013). On note également qu'une controverse persiste sur la carcinogénicité du glyphosate basée sur les revues de diverses agences sanitaires européennes aux conclusions divergentes (IARC_2015, EFSA_2015). Il est important de noter que l'utilisation de glyphosate pourrait dans ces scénarios pré-

venir l'utilisation d'autres herbicides aux propriétés non moins toxiques. La présence de résidus d'herbicides dans les produits finaux est toutefois strictement contrôlée et réglementée.
Evaluation dans tous les scénarios : 0

Les herbicides appliqués pour la culture de betterave à sucre OGM ne sont pas plus toxiques que les herbicides appliqués dans la culture conventionnelle.

Consommateurs – Acceptation

L'expérience de vente d'Aerni et al. (2011) a montré que les consommateurs suisses achèteraient sous certaines conditions du pain produit avec du maïs génétiquement modifié. Le refus des consommateurs reste toutefois élevé (communication orale de SKS et FRC). L'enquête d'Eurobaromètre a aussi montré que les Suisses ne sont pas favorables aux OGM (65% d'opinion défavorable, 2015). La majorité des consommateurs ne voit aucun avantage dans les aliments génétiquement modifiés, ou les tient pour douteux voire même nocifs (Eurobaromètre, 2010a).
Les avantages de la caractéristique « tolérance aux herbicides » sont plus difficiles à communiquer que ceux de la résistance à un parasite (SBV, 2013).
Evaluation dans tous les scénarios : -2

Actuellement, l'acceptation des OGM par les consommateurs est faible. Du sucre provenant de la culture de betterave à sucre tolérante aux herbicides ne serait probablement pas ou peu accepté.

Consommateurs – Niveau des prix

Le report des coûts de production et des coûts pour les mesures de séparation des flux fait monter le niveau des prix pour l'acheteur (Price et al., 2003). Les répercussions sur le prix dans le commerce de détail ne peuvent que faire l'objet de suppositions, en effet, de nombreux programmes de labels excluent les OGM. L'étiquetage du sucre provenant de betterave à sucre OGM serait obligatoire. Actuellement, les SAF pensent que le sucre de betteraves OGM ne peut pas être vendu à un autre prix que celui provenant de betteraves conventionnelles. La question de la relation future entre le non-OGM et la labélisation « Swissness » reste ouverte.
Evaluation dans tous les scénarios : -1

Comme la séparation des flux de produits engendre des coûts élevés, on peut admettre qu'au moins une partie de ces coûts est répercutée sur les produits (OGM et sans OGM). Des écarts de prix sont vraisemblables si les frais de séparation des flux de produits ne sont pas compensés par des avantages en termes de rendement.

3.2.3.2 Critères environnementaux

Biodiversité – Conservation de la biodiversité – Espèces OEA (objectifs environnementaux pour l'agriculture)

Evaluation du scénario A : -1

Dans la culture de betterave à sucre tolérante aux herbicides selon le scénario A, le glyphosate remplace un mélange de substances actives (métamitron, phenmédiphame, éthofumésate et desmédiphame) utilisées dans le contrôle des adventices. En tout, dans la culture de HT, la quantité de substances actives appliquée diminue de 3.9 à 2.16 kg/ha (Tableau 6 et 7) .

Des essais en plein champ menés en Grande-Bretagne (Farm Scale Evaluations, FSE) ont montré que le glyphosate peut combattre les mauvaises herbes plus efficacement que le contrôle phytosanitaire en culture conventionnelle (Champion, 2011). Cette amélioration peut avoir un effet négatif indirect sur les espèces d'oiseaux : moins de plantes signifie moins de graines qui peuvent représenter une importante source de nourriture pour certaines espèces d'oiseaux (Gibbons et al., 2006, Chamberlain et al., 2007, Jahn et al., 2013, renseignement de la Station ornithologique par e-mail, décembre 2013). Cet effet est indépendant de la sorte de betterave à sucre, et est dû uniquement à stratégie de lutte contre les adventices.

Les données de toxicités (aigües mais surtout chroniques) du glyphosate comme des autres herbicides conventionnels ainsi que de leur adjuvants (type POEA, voir plus haut) sur les mammifères (lapins, castors...), les oiseaux, les reptiles, les amphibiens, les insectes ainsi que les poissons sont parcellaires et s'échelonne entre toxicité chronique faible à modérée (Duke et Powles, 2008). Une comparaison toxicologique exacte entre le glyphosate et ses adjuvants avec les herbicides utilisés dans les méthodes conventionnelles est difficile dans l'état actuel des connaissances (Poletta et al., 2009, Relyea et Jones,

2009, Mamy et al., 2010). Dès lors on postulera une absence de changement sur les écosystèmes entre les systèmes OGM et conventionnels.

Les effets des herbicides, de la modification de la gestion phytosanitaires et de l'amélioration du contrôle des mauvaises herbes ne peuvent être que partiellement évalués faute de données mais peuvent avoir un effet sur la diversité des lichens, mousses et champignons (Newmaster et al., 1999).

L'amélioration du contrôle des mauvaises herbes dans la culture de betterave à sucre HT est corrélée négativement avec la fréquence d'insectes associés à des adventices (p. ex. des papillons) (Haughton et al., 2003). Pour ces espèces d'insectes comme pour les oiseaux, il y a une corrélation positive avec la présence d'adventices qui peuvent leur servir d'habitat.

Enfin, un meilleur contrôle des adventices réduit les niches écologiques, pour les oiseaux en particulier, ce qui pourrait avoir un impact global négatif sur tout l'écosystème.

Evaluation du scénario B : -1

Dans le scénario B, pour la culture de betterave à sucre HT, le glyphosate remplace les substances utilisées dans la culture conventionnelle. En tout, la culture de betterave H7-1 permet de réduire de plus de moitié la quantité de substance active épandue (de 4,57 kg/ha à 2,16 kg/ha, Tableau 7).

La toxicité aiguë des herbicides supplémentaires utilisés en cas d'infestation importante (chloridazon, diméthénamide, Ttriflusulfuron-méthyle) est modérée à faible pour les oiseaux, les reptiles, les mammifères, les poissons et les amphibiens (SIS, 2013). Aucune donnée n'est disponible quand la toxicité chronique de ces substances ni de leurs surfactants (naphte).

Comme pour le scénario A, le contrôle des adventices réduit la diversité et les niches pour les animaux pour les oiseaux en particulier, ce qui pourrait avoir un impact global négatif sur tout l'écosystème.

Biodiversité – Conservation de la biodiversité – Flux génétique sur des plantes sauvages apparentées et invasivité dans les habitats naturels

Evaluation dans tous les scénarios : 0

La betterave à sucre n'a pas de plantes sauvages apparentées en Suisse, ce qui fait qu'on peut exclure un flux génétique sur des plantes sauvages apparentées (Sweet et Bartsch, 2012). La tolérance aux herbicides ne confère *a priori* pas d'avantages dans les habitats naturels, l'invasivité de cette variété n'est pas différente de celle de la betterave à sucre conventionnelle (Sweet et Bartsch, 2012). La culture de HT est donc jugée équivalente pour ce critère à celle de betterave à sucre conventionnelle.

Biodiversité – Fonctions écosystémiques – Pollinisateurs

Evaluation du scénario A : -1

La culture de betterave à sucre HT n'entraîne pas de diminution des applications d'insecticides et la toxicité des herbicides utilisés reste comparable dans les deux itinéraires techniques.
Cependant, la diminution de la quantité et de la variété des adventices peut avoir un impact indirect sur la pollinisation (Hawes et al., 2003) même si des essais en plein champ n'ont pas montré de changement dans les populations de pollinisateurs aux abords des champs de betterave HT (Roy et al., 2003). Pour la culture de betterave à sucre HT, une diminution de la pollinisation est attendue.

Evaluation du scénario B : -1

L'évaluation du scénario B est analogue à celle du scénario A.

Biodiversité – Fonctions écosystémiques – Lutte biologique

Evaluation du scénario A : -1

Le glyphosate ainsi que les herbicides auxquels il se substitue (Tableau 6) ne sont que peu à modérément toxiques envers les insectes auxiliaires (la guêpe braconide *Aphidius rhopalosiphi,* l'acarien prédateur *Typhlodromus pyri* et la mouche chrysope *Chrysoperla carnea.*

Une corrélation positive entre la biomasse des mauvaises herbes et le nombre de certains arthropodes comme les staphylinidés et les carabidés a été observée (Hawes et al., 2003). Dans l'ensemble, le contrôle des adventices entraîne une diminution de leur biomasse et une réduction de la fréquence des arthropodes, y compris les espèces utiles (Bigler et Albajes, 2011).

Dans les champs de betterave à sucre HT, on a trouvé moins de parasitoïdes à la fin de la saison de culture qu'en culture conventionnelle (Hawes et al., 2003). Toutefois, les différences entre la gestion

phytosanitaire dans la culture de HT tolérante aux herbicides et la culture conventionnelle sont faibles par rapport p. ex. aux différences dans les tendances saisonnières.

Pour la culture de betterave à sucre HT, la réduction de ressources importantes (biotope et proies qui y vivent) a un impact négatif sur les auxiliaires de cultures utilisés en lutte biologique.

Evaluation du scénario B : -1

L'évaluation du scénario B est analogue à celle du scénario A.

Biodiversité – Fonctions écosystémiques – Fonctions dans l'écosystème sol

Evaluation du scénario A : 0

La toxicité aiguë et chronique du glyphosate pour les vers de terre et nématodes, tout comme celle du Métamitron, Phenmédiphame, Éthofumésate et Desmédiphame, est modérée. Seul l'éthofumésate a un effet sur la minéralisation du carbone et de l'azote du sol (voir critère ressources).

Les populations de vers de terre et les nématodes sont influencés en premier lieu par le type de travail du sol et par les conditions météorologiques qui sont similaires entre scénarios OGM et conventionnels (Squire et al., 2003).

Pas ou peu d'effets sur les organismes du sol et leurs fonctions dans l'écosystème sol ne sont observables entre les deux systèmes de cultures.

Evaluation du scénario B : 0

Pas de toxicité plus élevée pour les herbicides utilisés en complément dans la culture conventionnelle pour les écosystèmes du sol.

L'évaluation du scénario B est analogue à celle du scénario A.

Biodiversité – Fonctions écosystémiques – Fonctions dans l'écosystème eau

Evaluation du scénario A : 0

Le glyphosate et ses adjuvants ainsi que les substances actives des herbicides de la culture conventionnelle de betterave à sucre ont une toxicité aiguë faible à modérée sur les poissons, les invertébrés aquatiques, les crustacés et les algues.

L'influence du changement de molécule herbicide dans l'itinéraire technique n'a que peu ou pas d'effet pour les écosystèmes aquatiques.

Evaluation du scénario B : 0

L'évaluation du scénario B est analogue à celle du scénario A.

Qualité environnementale – Air – Gaz à effet de serre – Dioxyde de carbone

Evaluation du scénario A : +1

L'itinéraire technique utilisant la betterave HT permet une plus grande flexibilité et moins d'épandage. Les transports supplémentaires induits par la coexistence sont effectués par le rail.

Il en résulte une évaluation légèrement supérieure pour la culture de betterave à sucre HT dans le scénario A.

Evaluation du scénario B : +1

Pas d'épandage supplémentaire comparé au scénario A

L'évaluation du scénario B est analogue à celle du scénario A.

Qualité environnementale – Air – Gaz à effet de serre – Oxydes d'azote

Evaluation dans tous les scénarios : 0

Pas de modification dans la gestion des engrais

Qualité environnementale – Air – Polluants atmosphériques – Ammoniac

Evaluation dans tous les scénarios : 0

Pas de modification dans la gestion des engrais

Qualité environnementale – Air – Polluants atmosphériques – Oxydes d'azote

Qualité environnementale – Air – Polluants atmosphériques – Suie de diesel

Evaluation du scénario A : +1

L'itinéraire technique utilisant la betterave HT permet une plus grande flexibilité et moins d'épandage. Les transports supplémentaires induits par la coexistence sont effectués par le rail.
Il en résulte une évaluation légèrement supérieure pour la culture de betterave à sucre HT dans le scénario A.

Evaluation du scénario B : +1

Pas d'épandage supplémentaire comparé au scénario A

L'évaluation du scénario B est analogue à celle du scénario A.

Déficit en manganèse dans la betterave à sucre résistante au glyphosate

Le manganèse est un micronutriment essentiel pour le métabolisme végétal et le développement des plantes (Hänsch et Mendel, 2009). Les expériences dans la culture de plantes tolérantes au glyphosate, en particulier de soja, montrent que le glyphosate peut perturber l'absorption de micronutriments et entraîner des déficits en manganèse même si ce résultats ont été parfois contestés (Cakmak et al., 2009, Hartzler, 2010). Pour cette raison, le fabricant (Monsanto) recommande de procéder à des applications de certains micronutriments après traitement (Huber, 2007). Toutefois, le déficit en manganèse ne semble pas être transposable à la betterave à sucre (Holtschulte et al., 2011).On admet dans l'évaluation de la betterave à sucre tolérante HT que le bilan nutritif ne change pas par rapport à la betterave conventionnelle et qu'il n'y a pas besoin d'apport supplémentaire en micronutriments, ce qui resterait par ailleurs à confirmer expérimentalement dans des conditions de cultures suisses.

Qualité environnementale – Eau – Run-offs engrais

Evaluation dans tous les scénarios : 0

Pas de modification dans la gestion des engrais

(Voir encadré « Déficit en manganèse dans la betterave à sucre tolérante aux herbicides »).

Qualité environnementale – Eau – Run-offs pesticides

Evaluation du scénario A : +1

La diminution de la quantité de substances actives épandues (Tableau 6) et l'équivalence probable de la toxicité et du transport par ruissellement du glyphosate et des produits conventionnels pour les organismes aquatiques font que la culture de betterave HT a un impact plus faible que la culture conventionnelle sur les rejets de pesticide dans l'eau.

Evaluation du scénario B : +2

Le potentiel de transport de ces substances par les eaux de ruissellement est moyennement élevé pour le Glyphosate et l'Éthofumésate, et faible pour le Métamitron, Phenmédiphame, Chloridazone, Diméthénamide et Triflusulfuron-méthyle. On note cependant que le potentiel d'infiltration dans les eaux souterraines de métamitron et ethofumésate est élevé (PPDB). La diminution de la quantité et qualité des substances actives épandues fait que la culture de betterave HT a un nettement impact plus faible que la culture conventionnelle sur les rejets de pesticides dans l'eau (Daouk et al., 2013) .

Qualité environnementale – Sol – Charge physique – Erosion

Evaluation dans tous les scénarios : 0

D'après l'ordonnance sur les paiements directs, le semis direct, le semis en bandes fraisées, le semis en bandes et le semis sous litière sont considérés comme des techniques culturales préservant le sol (OPD, 2014). Par rapport au travail du sol conventionnel utilisant le labourage, ces méthodes peuvent réduire certains effets environnementaux de la culture : cela peut améliorer la stabilité et la structure du sol, empêcher l'érosion et l'infiltration de l'eau, réduire la consommation d'énergie et donc les émissions de CO2 (Holland, 2004).

Dans la culture de betterave à sucre en Suisse, en plus du travail du sol conventionnel avec labourage, on utilise surtout le semis sous litière, alors que le semis direct est comparativement peu pratiqué (renseignement oral du centre betteravier suisse CBS, 2013). Cela n'est pas uniquement dû au fait que cette technique rend la lutte contre les mauvaises herbes plus difficile, mais aussi que la betterave à sucre est très exigeante en ce qui concerne son lit de semences. Les méthodes de culture qui préservent les sols (comme le semis direct) sont particulièrement difficiles sur les sols lourds et non perméables, voire souvent impraticables (CBS, 2013) et ne mène qu'à une fixation du carbone marginale sous le climat suisse (Soane et al., 2012).

En général, la culture de plantes tolérantes aux herbicides peut favoriser les techniques culturales préservant le sol, car cela permet de continuer à combattre efficacement les adventices. Aux USA, la culture de betterave à sucre HT a permis de promouvoir des méthodes de culture qui préservent le sol et de diminuer le labourage (Kniss, 2010, Stachler et al., 2011). En Suisse, là où le sol le permet, des techniques culturales préservant le sol sont déjà appliquées.

Comparée à la culture de betterave à sucre conventionnelle, la culture de betterave à sucre tolérante aux herbicides n'a pas d'influence sur le travail du sol et donc pas d'influence sur l'érosion qui peut en résulter (voir encadré « Techniques culturales préservant le sol dans la culture de betterave à sucre »).

Qualité environnementale – Sol – Charge physique – Compactage

Evaluation dans tous les scénarios : +1

La réduction du nombre de passages de trois à deux des machines agricoles pour l'épandage d'herbicides entraîne donc une réduction du compactage.

Qualité environnementale – Sol – Pollution chimique – Engrais

Evaluation dans tous les scénarios : 0

Pas de modification dans la gestion des engrais

Qualité environnementale – Sol – Pollution chimique – Pesticides

Evaluation du scénario A : +1

Réduction de la quantité de substances actives épandues et équivalence de toxicité du glyphosate et des produits conventionnels pour les organismes du sol. La culture de HT est jugée légèrement supérieure à la culture de betterave à sucre conventionnelle.

Evaluation du scénario B : +2

Diminution de la pression sur la ressource sol par la réduction de plus de moitié de la quantité de substances actives épandues et équivalence de toxicité du glyphosate et des produits conventionnels pour les organismes du sol. La culture de HT est jugée nettement supérieure à la culture de betterave à sucre conventionnelle.

Besoins en ressources – Eau

Evaluation dans tous les scénarios : 0

Pas d'influence sur l'utilisation de la ressource eau.

Besoins en ressources – Energie

Evaluation dans tous les scénarios : -2

Les coûts liés aux mesures de coexistence (transport, entrepôts, installations de séparation entraineraient une augmentation importante des besoins en énergie (*i.e.* baisse de de la durabilité)

Besoins en ressources – Terrain

Evaluation dans tous les scénarios : +1

Ce critère est lié au rendement et on peut attendre à un meilleur rendement par surface (pour que l'agriculteur utilise cette variété HT). On note cependant que l'effet des traits « HT » sur les rendements reste modestes (Fernandez-Cornejo et al., 2014).

Besoins en ressources – Pesticides

Evaluation du scénario A : +1

La réduction de l'application des pesticides (Tableau 6) diminue les besoins en substances actives (amélioration du critère de durabilité)

Evaluation du scénario B : +2

La réduction de l'application des pesticides est plus importante en case d'infestation d'adventices plus fortes (pas d'application supplémentaire d'herbicides, Tableau 7). Les besoins en pesticides en sont d'autant plus diminués (amélioration forte de la durabilité).

Besoins en ressources – Engrais

Evaluation dans tous les scénarios : 0

Pas de modification dans la gestion des engrais

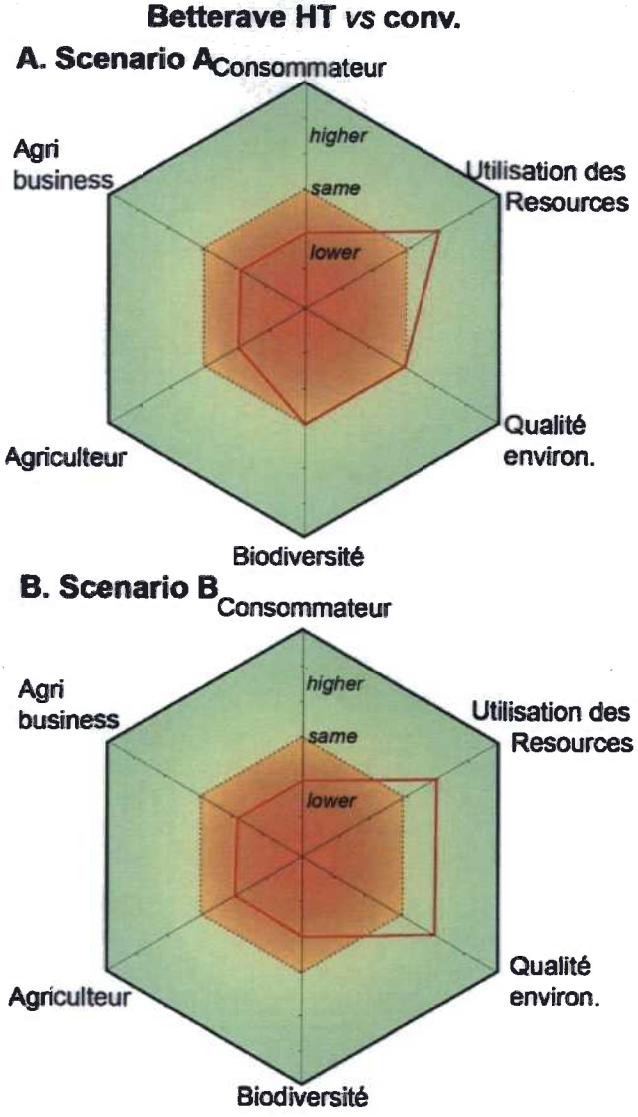
3.2.4 Synthèse de l'analyse de durabilité de la betterave HT

Les deux scénarios qui utilisent de la betterave HT montrent après analyse par notre modèle de MCDA montrent une durabilité nettement inférieure aux systèmes conventionnels dans la dimension socio-économique (Figure 5). En effet, les trois composantes majeures : agriculteurs, agribusiness et consommateurs sont impactés négativement par l'utilisation d'un OGM cette espèce. Les résultats des consultations avec la branche sucrière (concentrée autour des sucreries de Frauenfeld et Aaberg) montrent qu'une adaptation des structures existantes à un flux séparés aurait un impact important qui, en amont, pourrait prévenir la mise en culture de betterave GM. La séparation des flux de marchandises et les contrôles de qualité des produits sont déterminants pour l'industrie du sucre. En raison de l'importance que revêt la caractéristique « sans OGM » pour l'image positive de l'agriculture suisse et de ses produits, la question de savoir si les PME et autres entreprises accepteront les OGM reste ouverte. Si on rajoute le fait que l'avantage agronomique lié aux trait « HT » en terme de rendement chez la betterave reste vague (voir section 3.2.3.2) ainsi que la difficile communication au consommateur de l'avantage agronomique potentiel (associé à l'utilisation d'un herbicide total), il devient évident que la viabilité de la culture de betterave HT reste très limitée.

En terme environnemental, la durabilité de la culture de la betterave HT est proportionnelle au taux d'adventices présentes dans le champ. Cependant, dans les deux scénarios, la relative simplification de l'itinéraire technique et la substitution de molécules actives toxiques par le glyphosate a un impact positif sur la pression et l'utilisation des ressources (seulement scénario B). On remarque que les deux scénarios présentés n'impliquent pas de culture sans labour (no-till), qui sont peu utilisées mais autorisés en Suisse. La contribution des betteraves HT à la qualité environnementale reste ambivalente : d'un côté la raréfaction d'adventices par le contrôle via un herbicide total implique un impact négatif sur la biodiversité, de l'autre la simplification de l'itinéraire technique a un impact positif sur l'érosion et le compactage du sol. On note par ailleurs que le modèle utilisé ici (MCDA) reflète difficilement la durabilité dans le temps de la résistance (apparition d'adventices HT) ainsi que l'impact des rotations de culture sur les populations concurrentes (Speiser et al., 2013).

En résumé, sans une garantie d'augmentation du rendement drastique, la betterave HT n'a que peu de chance de se montrer viable pour l'agriculture suisse (voir analyse de sensitivité, figure 7), et ce malgré un problème de gestion des adventices connu.

Figure 5. Evaluation de la betterave à sucre tolérante aux herbicides H7-1, scénario A.



3.3 Pomme de terre résistante au mildiou (RM)

3.3.1 Introduction

Depuis 2010, les pommes de terre occupent en Suisse environ 11'000 ha chaque année (OFAG, 2013), ce qui correspond à un net recul par rapport à autrefois. En 1965, on produisait presque trois fois plus de pommes de terre qu'aujourd'hui (swisspatat, 2014). Cette évolution est à mettre sur le compte de la perte d'importance de la pomme de terre dans l'alimentation des Suisses : on consomme environ 43 kg de pommes de terre par an et par personne (LID, 2014).Environ un tiers des quelque 450'000 tonnes de pommes de terre récoltées sont utilisées comme pommes de terre de table et de transformation (OFAG, 2013).

Le mildiou, causé par le champignon *Phytophtora infestans,* est la principale maladie de la pomme de terre. Il peut anéantir toute une récolte lorsqu'il se déclare tôt et avec virulence. On estime que chaque année 20 % de la récolte mondiale de pommes de terre est perdue en raison du mildiou. La pression du mildiou varie d'année en année, principalement à cause des conditions météorologiques. En Suisse, la maladie est combattue efficacement avec des fongicides, ce qui demande de gros investissements. Les agriculteurs sont soutenus dans leur lutte par l'outil en ligne « Phytopre » (www.phytopre.ch). Phytopre fournit des prévisions sur l'apparition du champignon et des recommandations pour lutter contre la maladie en se basant sur la situation actuelle d'attaque de mildiou et sur les conditions météorologiques.

En 2013, la variété Agria, qui est la variété principale des producteurs suisses de pommes de terre (USPPT, 2013), a occupé 22 % de la surface cultivée en pommes de terre (swisspatat, 2014) mais est sensible au mildiou. Elle est principalement utilisée pour la transformation en frites et en chips. Agria est la variété qui a donné naissance à la variété Fontane (Hebeisen et al., 2013). La Fontane a, à son tour, été utilisée pour développer la variété transgénique résistante au mildiou Fortuna (Biotechnologie.de, 2011).

Deux gènes de l'espèce de pomme de terre mexicaine *Solanum bulbocastanum*, *Rpi-blb1* et *Rpi-blb2* ont été introduits dans la variété Fortuna. Ces gènes sont impliqués tous deux dans la réaction hypersensible de cette plante : l'apparition du champignon provoque immédiatement la mort locale de la cellule concernée, ce qui stoppe l'infection. En novembre 2011, l'entreprise BASF a déposé une demande d'autorisation de culture et de commercialisation de la pomme de terre Fortuna comme aliment et fourrage. En janvier 2013, le pétitionnaire a retiré cette demande, ainsi que toutes les demandes pendantes auprès des autorités d'autorisation européennes. Ce retrait est fondé sur des raisons stratégiques : d'une part, l'entreprise entrevoit trop peu de chances sur le marché européen compte tenu de la complexité des processus d'autorisation et de l'opposition d'une majorité de l'opinion publique.

Disséminations expérimentales planifiées de pommes de terre RM
En 2015, des essais de culture de pommes de terre résistantes au mildiou ont été effectués sur le site protégé d'Agroscope, à Zurich Reckenholz. Il s'agit de plusieurs lignées de pommes de terre qui portent divers gènes de résistance, et qui ont été développées par l'Université de Wageningen (Jo et al., 2013). L'objectif est d'étudier si la résistance observée en milieu fermé marche aussi en plein champ (Agroscope, 2014b). Les premiers résultats sont en cours d'analyse.

3.3.2 Scénario

On admet dans les deux scénarios on cultive soit la variété Agria (conventionnelle) ou Fortuna (GM) destinées à l'élaboration de frites. Hormis les différences dans la lutte contre le mildiou, la culture de pommes de terre RM ne donne lieu à aucun autre changement dans le mode de culture (engrais, arrosage, lutte contre les mauvaises herbes, travail du sol) et que l'intensité de l'attaque de *Phytophtora infestans* est moyenne. Selon les hypothèses du modèle de Speiser et al. (2013), les applications de pesticides dans la culture des pommes de terre Fortuna résistantes au mildiou sont réduites par rapport à ce qui se fait dans la culture de pommes de terre Agria, sensibles au mildiou (Tableau 8).

En outre, les hypothèses suivantes s'appliquent :

- Toutes les autres mesures phytosanitaires sont les mêmes pour la culture de pommes de terre Fortuna et pour celle d'Agria. En tout, le nombre d'application de fongicide passe de huit à trois.
- Pendant la culture, on admet une météorologie moyenne, sans périodes humides de longue durée,

avec une attaque moyenne de *Phytophtora infestans*.

- Le recours aux fongicides protège aussi avec succès les Agria contre les dégâts du mildiou.
- Les habituelles pertes de poids des pommes de terre durant le stockage (~1 % par mois, DBK, 2010) sont les mêmes pour Fortuna que pour Agria.
- Pour les pommes de terre génétiquement modifiées, les mêmes prescriptions de qualité et de commercialisation que pour les pommes de terre conventionnelles s'appliquent.
- On admet qu'il n'y a pas d'allongement de trajets de transport dans le secteur aval.
- On admet qu'aucune installation de production n'est construite pour la transformation en frites, mais que le flux des produits est séparé spatialement pour le stockage, et dans le temps pour le processus de transformation sur des lignes de production déjà existantes.
- Pour l'évaluation, on admet que la transformation des pommes de terre OGM se fait après celle des pommes de terre conventionnelles et avant le nettoyage minutieux hebdomadaire. Ce nettoyage de l'installation de production a déjà lieu actuellement, il est efficace et suffisant pour pouvoir ensuite transformer des pommes de terre conventionnelles sans risque de contamination.
- Les transformateurs de pommes de terre concluent des contrats de culture avec les agriculteurs, comme cela se pratique actuellement.

Tableau 8. Applications de fongicides pour contrôler le mildiou dans la culture de pommes de terre

Système de culture	Produit	Passages, dosage (l, kg / ha)	Quantité de substance active (g / l, kg)	Coformulants	Quantité de substance active (kg / ha)	Prix du produit (CHF/ l, kg)	Prix (quantité totale) CHF
Conv.	Consento	3 x 2.0	375 Propamocarbe hydrochloride 75 Fénamidone	inconnu	2.70	32.5	195[10]
	Acrobat MZ WG	2 x 2.5	667 Mancozèbe 75 Diméthomorphe	inconnu	3.71	31.6	158[11]
	Dithiane Neotec	3 x 3.0	750 Mancozèbe	Méthénamine	4.5	18.3	165[12]
	Total :				**10.91**		**518**
OGM	Consento	1 x 2.0	375 Propamocarbe hydrochloride 75 Fénamidone	inconnu	0.90	32.5	65
	Acrobat MZ WG	1 x 2.5	667 Mancozèbe 75 Diméthomorphe	inconnu	1.855	31.6	79
	Dithiane Neotec	1 x 3.0	750 Mancozèbe	Méthénamine	1.5	18.3	55
	Total :				**4.255**		**199**

3.3.3. Evaluation de la durabilité

3.3.3.1. Critères socio-économiques

Agriculteur – Bilan des bénéfices – Coûts variables – Coûts de production

Evaluation : 0

Le rendement potentiel de la variété de pomme de terre Fortuna résistante au mildiou est estimé

[10] Strickhof, Pflanzenschutzmittel im Feldbau (Strickhof, 2014).
[11] Strickhof, Pflanzenschutzmittel im Feldbau (Strickhof, 2014).
[12] Strickhof, Pflanzenschutzmittel im Feldbau (Strickhof, 2014).

égal à celui de la variété conventionnelle Agria. En général, les éventuelles pertes de rendement dues au mildiou dépendent fortement des conditions saisonnières (l'humidité favorise le développement du champignon) et sont limitées grâce à l'emploi de fongicide.

Agriculteur – Bilan des bénéfices – Coûts variables – Prix du marché

Dans le cadre juridique actuel, les commerçants de pommes de terre doivent différencier les produits génétiquement modifiés de ceux qui ne le sont pas. Il est probable qu'il en résultera des prix plus bas pour l'agriculteur qui fournit des OGM, du fait de la pression exercée sur les agriculteurs en raison des coûts supplémentaires engendrés (Kohler, 2005). Une plus-value pour les produits contrôlés sans OGM est aussi vraisemblable (Bock et al., 2002). En témoigne l'importance croissante des systèmes de préservation de l'identité, comme les flux de produits séparés, qui sont mis en place lorsque certaines caractéristiques de qualité doivent permettre d'obtenir des prix plus élevés (Oehen et al., 2006). Les prix des pommes de terre sont fixés deux fois par an par l'interprofession swisspatat regroupant les producteurs, les transformateurs et les commerçants, l'objectif étant d'assurer le revenu de l'agriculteur et d'encourager la culture de la pomme de terre.

Evaluation : -1

Le prix du marché des patates OGM sera donc plus bas que son équivalent conventionnel.

Agriculteur – Bilan des bénéfices – Coûts variables – Coûts de production

Actuellement, les coûts des tubercules de pommes de terre à planter s'élèvent à environ 3'000 CHF/ha (Agridea 2013a). Pour la culture de pommes de terre RM, un surcout de 30 % est à prévoir (environ 900 CHF/ha) (Speiser et al., 2013). En revanche, les coûts des pesticides utilisés pour lutter contre le mildiou diminuent : les économies s'élèvent avec les prix actuels à environ 320 CHF/ha, sans les frais de machines (Strickhof, 2014). Pour lutter contre d'autres champignons et pour la gestion des résistances, il est tout de même nécessaire d'effectuer quelques applications de fongicides dans la culture de pommes de terre résistantes au mildiou (Tableau 8). Dans l'ensemble, les coûts totaux de production augmentent pour la culture de pommes de terre RM. A noter que les frais pour d'éventuelles mesures de coexistence n'ont pas encore été pris en compte. En raison des propriétés biologiques de la pomme de terre, une bande d'isolation de 12 m conformément à l'ordonnance de coexistence du Conseil fédéral (OFEV et OFAG, 2013) sera appliquée. La séparation des pommes de terre RM et des pommes de terre non OGM entraîne donc un surcoût sur l'exploitation. On note que les agriculteurs cultivent en général plusieurs variétés de pommes de terre pour gérer les risques et la charge de travail (renseignement oral de swisspatat, 2014).

Evaluation : -1

La culture de pommes de terre RM coûte plus cher à cultiver que la pomme de terre conventionnelle.

Agriculteur – Bilan des bénéfices – Coûts variables – Charge de travail

Les heures de travail épargnées par la diminution de l'utilisation de pesticides s'élèvent à environ 0,86 MOh par hectare (Agridea, 2013b). Toutefois, ce bénéfice est compensé par l'application de strictes mesures de coexistence (installation de bandes d'isolation, séparation des procédures de culture).

Evaluation : 0

La charge de travail pour la culture de RM est donc jugée équivalente à celle nécessaire pour la culture conventionnelle.

Agriculteur – Structures socio-économiques – Garantie de la propriété et liberté économique

Le degré de garantie de la propriété et de la liberté économique est déterminé par les conditions prescrites pour la garantie de la coexistence (Demont & Devos, 2008). Il peut être considéré que le degré de garantie de la propriété et de la liberté économique augmente lorsque la culture d'une variété OGM est possible : l'autorisation des OGM permet aux agriculteurs de choisir parmi une gamme de systèmes de culture plus large. L'engagement dans un itinéraire technique dépendant de produits et de semences spécifiques pourrait cependant moduler cette relative liberté (Speiser et al., 2013). Si les mesures de coexistence sont efficaces, elles permettent également aux producteurs voisins de cultiver librement ce qu'ils désirent.

Evaluation : +1

L'autorisation de la culture d'OGM élargi les choix de culture de l'agriculteur.

Agriculteur – Structures socio-économiques – Acceptation au niveau local

L'acceptation des OGM au niveau des structures agricoles locales est très faible. Le sondage de Schweiger et Szerencsits (2009) réalisé parmi les agriculteurs de la région de Zurich montre que la disposition à cultiver des OGM dépend fortement d'un point déterminant : « la connaissance de l'exploitation présumée des voisins ». L'acceptation dépend aussi des conditions de responsabilités civiles en vigueur en cas de litige. D'autres acteurs locaux concernés par la culture de plantes génétiquement modifiées sont les apiculteurs (prise de position sur le projet de coexistence d'Apisuisse, 2013).

Evaluation : -1

L'acceptation locale de la pomme de terre RM est plus faible que la culture conventionnelle.

Agriculteur – Structures socio-économiques – Pratiques agricoles

Avec la culture de pommes de terre RM, les agriculteurs changent de méthode de gestion phytosanitaire. La simplification de la lutte contre les champignons augmente la flexibilité dans des itinéraires techniques très exigeants. La pression de la maladie dans la culture de pommes de terre dépend, outre des conditions météorologiques, des mesures prophylactiques sur le terrain et de l'emploi de semences saines. Les gains en flexibilité pourraient être au détriment d'un savoir-faire et d'une gestion intégrative des pathogènes.

Evaluation : 0

La culture des patates RM n'a pas d'impact significatif sur les pratiques agricoles

Agribusiness – Bilan des bénéfices – Secteur amont – Capacité d'innovation

La culture de pomme de terre RM permettrait d'étudier la pertinence de cette technologie pour la Suisse. On peut penser qu'en respect avec un déploiement étape par étape, conformément à la législation, suffisamment de données pourraient informer sur les avantages et les limitations d'un tel système. La dynamique des gènes de résistance utilisé en plein champs mériterait de plus amples recherches afin d'en améliorer l'efficacité à long terme.

Evaluation dans tous les scénarios : +1

L'emploi en plein champ de variété RM pourrait permettre d'acquérir de meilleures connaissances sur les dynamiques et mécanismes de résistance, ce qui pourrait avoir un impact positif sur l'innovation à moyen terme.

Agribusiness – Bilan des bénéfices – Domaine amont – Consommations intermédiaire (semence)

La totalité des semences de pommes de terre plantées par les agriculteurs en Suisse sont importées. La culture de pomme de terre RM ne changera pas ce paramètre.

Evaluation : 0

Agribusiness – Bilan des bénéfices – Domaine amont – Consommations intermédiaires (pesticides)

En Suisse, la pomme de terre est l'une des cultures les plus dépendantes des pesticides. D'après le résumé du rapport agricole 2012, on épand en moyenne 14 kg de substances actives en jusqu'à 15 applications par an et par hectare. Plus de la moitié de ces applications concerne des fongicides. La diminution des applications de fongicides est un objectif de la pomme de terre RM (dans notre scénario : environ 6,6kg) et les ventes de pesticides diminueraient proportionnellement.

Evaluation : -1

La culture de la pomme de terre RM permet une économie de pesticide, donc une diminution des ventes de substances actives.

Agribusiness – Bilan des bénéfices – Secteur aval – Flux des produits, préservation de l'identité

Le transport des pommes de terre de transformation passe du champ à un entrepôt intermédiaire décentralisé où les entreprises transformatrices viennent chercher les quantités nécessaires. Les entreprises transformatrices ont également un entrepôt. Les pommes de terre y sont pesées à la livraison pour en fixer le prix, et différents tests de qualités effectués. Le stockage est effectué sous atmosphère protégée pour minimiser les pertes dues au stockage et freiner la germination des pommes de terre (par l'application d'inhibiteurs de germination et une température constante). En Suisse, le transport et

le stockage se font dans des caisses (paloxes) qui portent une étiquette avec les données d'origine. La séparation éventuelle de pomme de terre RM ne nécessiterait pas de dépenses supplémentaires (renseignement oral de swispatat, 2014).

Au moment de la transformation, l'installation de production est chargée par lots, ce qui garantit une entière traçabilité depuis l'exploitation agricole jusqu'au produit fini (frites en sachets scellés, etc.). La production de frites génère des déchets de pommes de terre et les pelures ainsi que les morceaux de pommes de terre qui sont utilisés pour fabriquer des röstis, des croquettes ou de la purée de pommes de terre doivent être séparés. Les restes de pommes de terre qui ne conviennent pas pour la fabrication d'aliments sont utilisés pour l'alimentation animale ou dans des installations de production de biogaz. Là aussi, il y a une obligation de séparation et de déclaration. Les installations de production de frites ne sont actuellement pas équipées pour la séparation spatiale des flux de produits.

Dans le cas d'utilisation de pomme de terre RM, une séparation temporelle est donc nécessaire, comme cela se fait actuellement pour les pommes de terre issues d'agriculture biologique (nettoyage des installations) voir même la construction de nouvelles installations séparées dédiées aux OGM.

Evaluation : -2

La préservation de flux de marchandises distincts nécessite de coûteux efforts dans le cas de la culture de pomme de terre RM.

Agribusiness – bilan des bénéfices – Secteur aval – Débouchés commerciaux

Les prescriptions d'étiquetage permettraient aux produits OGM une visibilité envers l'acheteur. Or, en l'absence de demande, soit les marges issues de la culture doivent être plus importantes, soit le produit doit montrer un avantage pour le client. La pomme de terre RM ne remplit aucun de ces deux critères (consultation avec les organisations de consommateurs).

Evaluation : -1

Les débouchés commerciaux sont faibles pour les pommes de terre RM

Agribusiness – Bilan des bénéfices – Secteur aval – Impact sur l'approvisionnement

Les règlementations légales de l'accès au marché établissent des contingents pour les importations. On importe des pommes de terre ce cadre, comme par exemple les pommes de terre précoces pour la consommation fraîche. L'auto-approvisionnement en pomme de terre à frites est déjà assuré avec des pommes de terre nationales.

Evaluation : 0

La culture de la pomme de terre RM n'a pas d'effet sur l'approvisionnement national

Agribusiness – Bilan des bénéfices – Secteur aval – Bureaux et entreprises de contrôle

Même effets que pour le maïs (voir plus haut)

Evaluation : +1

L'augmentation des contrôles d'OGM bénéficient aux entreprises de contrôle

Agribusiness – Structures socio-économiques – Garantie de la propriété et liberté économique

L'autorisation de la culture de la pomme de terre RM ne changera pas les possibilités d'import.

Evaluation : 0

Pas d'impact sur la liberté économique de la culture de pomme de terre RM

Agribusiness – Structures socio-économiques – Effets sur les PME

En Suisse, le stockage et la transformation de pommes de terre se déroulent dans un cercle restreint, ce qui facilite la surveillance de la branche (production de chips, de frites, de röstis, etc.). Il existe toutefois de nombreux centres collecteurs régionaux qui fournissent des pommes de terre pour la transformation. La culture d'OGM aura des effets économiques à ce niveau lorsqu'il s'agira pour ces entreprises de décider si elles veulent mettre en place une séparation de la marchandise OGM et non OGM, ou si elles veulent se limiter à une catégorie. Ces effets concernent aussi bien l'achat que la vente de leurs produits. Il est possible que les entreprises soient confrontées à des problèmes d'acceptation de la part de leur clientèle, lesquels se traduiront par des difficultés d'écoulement.

Evaluation : -1

La culture de pomme de terre RM aurait un impact sur les PME (surtout les transformateurs)

Agribusiness – Structures socio-économiques – Image

L'impact de la culture de pomme de terre RM sur l'image de l'agribusiness est similaire à celui de l'emploi du maïs Bt (voir plus haut).

Evaluation : -1

La valeur ajoutée engendrée par le renoncement aux OGM par l'agriculture et la filière alimentaire en Suisse serait perdue en cas de culture de la pomme de terre RM.

Consommateurs – Liberté de choix

L'interdiction des OGM a pu être considérée dans la littérature comme limitant le choix du consommateur (Bonfadelli et al., 2007).

Evaluation : +1

La culture de la pomme de terre RM augmentera le choix du consommateur.

Consommateurs – Santé

Les produits issus de la culture d'OGM en Suisse sont autorisés après confirmation de leur innocuité pour la santé. Le mécanisme de résistance au mildiou ainsi que les éventuels changements métaboliques dans les pommes de terre devraient être analysé avant toute mise sur le marché. On peut cependant imaginer que la diminution de l'application de fongicide ait un impact positif sur les résidus présents dans le produit final. On note la mise sur le marché récente aux USA d'une pomme de terre OGM produisant moins d'acrylamide après la friture, qui aurait, elle, un impact possible sur la santé des consommateurs (Zhu et al., 2016).

Evaluation : 0

Il est difficile d'évaluer l'impact réel sur la santé des consommateurs de la culture de pomme de terre RM et on postule ici qu'il est nul.

Consommateurs – Acceptation

En Suisse comme à l'étranger, les produits de l'agriculture suisse jouissent d'une excellente réputation. Elle est entre autres à mettre sur le compte de la qualité des produits, qui ne contiennent pas d'OGM pour le moment. Cette caractéristique est aussi spécifiée dans la Charte sur la stratégie qualité de l'agriculture et de la filière alimentaire suisse, signée par les unions paysannes, les associations de labels et les principaux commerçants de détail. Aux yeux de la branche, le renoncement à la technologie génétique offre d'importantes opportunités.

Evaluation: -1

La valeur ajoutée engendrée par le renoncement aux OGM dans l'agriculture et la filière alimentaire suisses serait perdue de par la culture de pomme de terre RM en Suisse.

Consommateurs – Niveau des prix

Le report des coûts de production et des coûts pour les mesures de séparation des flux fait monter le niveau des prix pour l'acheteur (Price et al., 2003). Les répercussions sur le prix dans le commerce de détail ne peuvent être estimées que grossièrement. D'après leurs statuts actuels, de nombreux programmes de labels excluent les OGM, ce qui fait qu'ils atteignent en moyenne un prix plus bas.

Evaluation: -1

Comme la séparation de flux de marchandises engendre des coûts élevés, on peut admettre qu'au moins une partie de ces coûts est répercutée sur les produits (OGM et sans OGM).

3.3.3.2 Critères environnementaux

Biodiversité – Conservation de la biodiversité – Espèces OEA (objectifs environnementaux pour l'agriculture)

Dans la culture de pommes de terre RM, les applications de fongicides sont moins nombreuses (Tableau 8). La toxicité des substances actives appliquées en culture conventionnelle (fénamidone, propamocarbe, diméthomorphe et mancozèbe présentent divers niveaux de toxicité (faible à important) envers les mammifères, oiseaux, reptiles, amphibiens, insectes (Geiger et al., 2010, McConnell et Sparling 2010). Par exemple, le mancozèbe a des effets tératogènes chez les grenouilles, retarde la régénération de membres chez les tritons et le développement des têtards d'amphibiens (Harris et al., 2000). Les résultats indiquent en outre que le Mancozèbe peut influencer négativement l'éclosion et la survie

de certains embryons d'amphibiens dans l'environnement naturel (Howard et al., 2002). De plus, la nature des coformulants de ces pesticides et leur toxicité éventuelle est très mal documentée.

En l'absence de donnée scientifique publiée, on ne peut pas déterminer avec certitude l'impact exact de la réduction des applications de fongicides dans la culture de pommes de terre RM mais on postule que la limitation des sprays de fongicide aurait globalement un impact positif sur ces espèces.

Evaluation : +1

L'impact de la culture de pomme de terre RM est globalement positif sur la faune et la flore auxiliaire.

Biodiversité – Conservation de la biodiversité – Flux génétique sur des plantes sauvages apparentées et invasivité dans les habitats naturels

En Suisse, il n'existe pas de plantes sauvages apparentées aux pommes de terre (Felber et al., 2007), ce qui exclut la possibilité de flux génétique sur des plantes sauvages. En Suisse, les pommes de terre ne sont pas considérées comme invasives (Speiser et al., 2013).

Evaluation : 0

La culture de pomme de terre RM est jugée ne pas avoir d'impact sur les flux génétiques ni d'augmentation de son invasivité.

Biodiversité – Fonctions écosystémiques – Pollinisateurs

Comme pour le critère « *espèce AOE* » la culture de pomme de terre RM implique une réduction théorique de la quantité de fongicide appliqué. Les fongicides utilisés (Tableau 8) ont un impact sur les populations d'insectes. Les fongicides peuvent réduire le potentiel pollinisateur des abeilles mellifères (Alarcon et al., 2009), diminuer la présence de champignons symbiotiques utiles dans les colonies d'abeilles (Yoder et al., 2012) ou augmenter les chances pour les abeilles d'être atteintes d'une infection parasitaire (Pettis et al., 2013). En l'absence de données en plein champ, les effets dus à la réduction des quantités de pesticides ne peuvent pas être déterminés avec certitude.

Il a été postulé ici que les fongicides n'avaient que peu d'impact sur les pollinisateurs si les recommandations d'utilisation étaient scrupuleusement observées : les applications effectuées en-dehors des vols de pollinisateurs.

Evaluation : 0

On estime ici que culture de pommes de terre RM est jugée équivalente à celle pour la culture de pommes de terre conventionnelles, bien que des données supplémentaires seraient nécessaires pour une évaluation exacte.

Biodiversité – Fonctions écosystémiques – Lutte biologique

Les fongicides appliqués en culture conventionnelles sont classés comme toxiques faibles à modéré pour les organismes classiquement utilisés en lutte biologique : l'acarien prédateur *Typhlodromus pyri*, et la guêpe braconide *Aphidius rhopalosiphi* ou *Trichogramma cacoeciae* (CESAR 2014). Le mancozèbe est nocif pour certains champignons entomopathogènes (Lagnaoui et Radcliffe 1998) comme *Beauveria bassiana* qui attaque le doryphore (Kahn et al., 2012). Le mancozèbe a un effet négatif sur les populations d'acariens prédateurs (Bernard et al., 2004, Auger et al., 2003, Barbar et al., 2007, Li et al., 2006).

L'impact des fongicides de synthèse sur ces populations d'auxiliaires rend la culture de pomme de terre RM plus avantageuse pour ce paramètre.

Evaluation : +1

La culture de pomme de terre RM limiter les impacts négatifs des fongicides sur les populations d'auxiliaires utilisés en lutte biologique.

Biodiversité – Fonctions écosystémiques – Fonctions dans l'écosystème sol

En général, les fongicides ont une plus grande influence sur les organismes du sol que les herbicides et les insecticides car ils sont directement actifs sur certains champignons du le sol tout en perturbant certaines populations de bactéries (Bünemann et al., 2006, Riah et al., 2014). D'autre part, le mancozèbe, l'azoxystrobine et la strobilurine modifient l'activité des déshydrogénases du sol, et influencent également la minéralisation du carbone (Cernohlavkova et al., 2009, Howell 2011). Certaines de ces molécules ont aussi des effets délétères sue les populations de vers de terre, nématodes mais aussi arthropodes et acariens (PPD, 2013, Al-Assiuty et al., 2014). De plus, les performances d'importants

groupes microbiens (décomposeurs, dénitrificateurs et nitrificateurs) dans l'écosystème sol ne sont en général pas perturbées par une réduction de leur diversité (Griffits et al., 2001 ; Wertz et al., 2007,). Il faut également noter que les pesticides n'ont théoriquement que des effets minimes ou réversibles sur les microorganismes du sol lorsqu'ils sont utilisés suivant les recommandations (Imfeld et Vuilleumier 2012, Riah et al., 2014).

Evaluation : 0

Ici encore, malgré l'absence de données en plein champ pour les pommes de terre RM en Suisse, on estime que l'impact de la culture de pomme de terre RM sur l'écosystème du sol est négligeable par rapport à la culture conventionnelle.

Biodiversité – Fonctions écosystémiques – Fonctions dans l'écosystème eau

Les fongicides dont l'application est réduite dans la culture de pommes de terre RM (Tableau 8) sont toxiques (toxicité aigüe modéré à forte) pour les organismes aquatiques (poissons, invertébrés, plantes aquatiques, algues) et peuvent avoir un effet nocif à long terme dans les eaux (PPDB, 2013). De la même façon que pour les autres écosystèmes, on considère que l'application suivant les conditions en vigueur est censée minimiser leurs effets négatifs (OPPh 2010).

On note que la pollution de l'eau est prise en compte sous le critère de « Qualité environnementale ».

Evaluation : 0

On postule que la culture de la pomme de terre RM n'a pas d'effet significatif sur l'écosystème de l'eau.

Qualité environnementale – Air – Gaz à effet de serre – Dioxyde de carbone

Dans la culture de pommes de terre RM, on estime économiser trois passages d'épandage de fongicides par rapport à la culture de pommes de terre conventionnelles. Le transport du champ à la transformation en aval reste inchangé.

Evaluation : +1

La diminution des applications de pesticides rendent la culture de la pomme de terre RM moins émettrice de gaz à effet de serre.

Qualité environnementale – Air – Gaz à effet de serre – Ammoniac

Evaluation : 0

La culture de pommes de terre RM n'a pas d'influence sur les émissions d'ammoniac, car la gestion des engrais reste la même que pour la culture conventionnelle.

Qualité environnementale – Air – Polluants atmosphériques – Oxydes d'azote

Evaluation : +1

Comme pour le CO_2

Qualité environnementale – Air – Polluants atmosphériques – Suie de diesel

Evaluation : +1

Comme pour le CO_2

Qualité environnementale – Eau – Engrais

Evaluation : 0

Pas de modification dans la gestion des engrais

Qualité environnementale – Eau – Pesticides

Comme exposé pour les critères *AOE* et *écosystèmes de l'eau et du sol,* la culture de pomme de terre RM est censée consommer moins de fongicides que la culture conventionnelle (Tableau 8).

Evaluation : +1

Qualité environnementale – Sol – Charge physique – Erosion

Pas de changement de l'itinéraire technique suivi pouvant résulter d'un changement dans l'érosion du sol.

Evaluation : 0

Qualité environnementale – Sol – Charge physique – Compactage

La diminution du nombre de passages pour l'épandage de fongicides dans les champs permet de limiter le compactate.
Evaluation : +1
La culture de pommes de terre RM entraîne donc une diminution du compactage du sol (augmentation de la durabilité du sol pour ce critère).

Qualité environnementale – Sol – Pollution chimique – Engrais
Pas de modification dans la gestion des engrais
Evaluation : 0

Qualité environnementale – Sol – Pollution chimique – Pesticides
La réduction des applications de fongicides dans la culture de la pomme de terre RM diminue la pollution du sol. Il en résulte un critère de durabilité jugé légèrement plus élevé.
Evaluation : +1

Besoins en ressources – Eau
Comparée à la culture conventionnelle, la culture de pommes de terre RM n'a pas d'influence sur l'utilisation d'eau dans les champs.
Evaluation : 0

Besoins en ressources – Energie
La diminution du nombre d'épandages est nettement compensée par l'énergie nécessaire à la mise en place d'une filière entièrement séparée pour assurer la coexistence de ce nouveau flux de marchandise.
Evaluation : -1
La culture de pomme de terre RM induit une consommation d'énergie supérieure, donc un critère de durabilité énergétique inférieur à la culture conventionnelle.

Besoins en ressources – Terrain
Comparée à la culture conventionnelle, la culture de pommes de terre RM n'a pas d'influence sur l'utilisation de surface agricole.
Evaluation : 0

Besoins en ressources – Pesticides
Dans la culture de pommes de terre RM, la quantité de substances actives épandue est réduite (Tableau 8).
Evaluation : +1
La culture de pommes de terre RM entraîne donc une diminution des besoins en fongicides. Le critère évaluant la durabilité liée à la limitation de l'emploi de pesticides légèrement supérieur pour cette culture comparée à la culture conventionnelle.

Besoins en ressources – Engrais
Evaluation : 0
Pas de modification dans la gestion des engrais

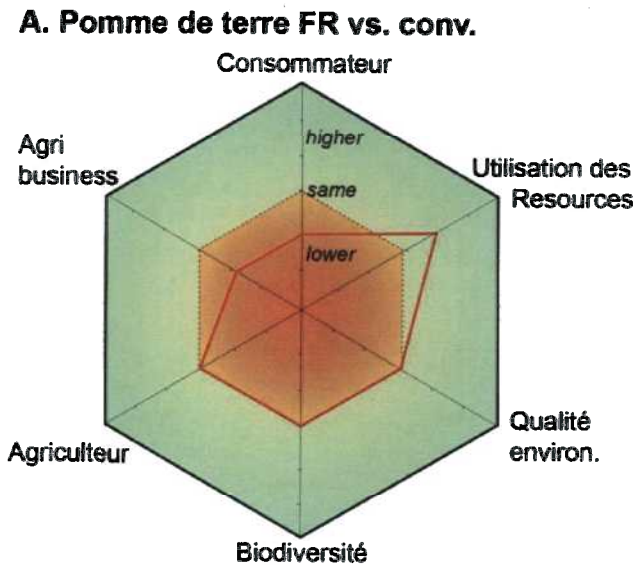
3.3.4. Synthèse de l'analyse de durabilité de la pomme de terre RM

On a vu que la pomme de terre transgénique résistante au mildiou a globalement une faible durabilité socio-économique si elle était cultivée dans les agrosystèmes suisses contemporains (Figure 6). Le scénario imaginé ici cible un secteur ou l'approvisionnement national est total et l'on ne peut pas prévoir ce que l'autorisation de la culture d'OGM en Suisse aurait comme conséquence sur le reste des pays de l'UE en termes d'importations comme d'exportations. Comme dans les cas du maïs et de la betterave précédemment analysés, le manque d'acceptation limite le marché potentiel pour un produit (les pommes de terre à frites). A cela s'ajoute les limitations techniques liées aux règles de coexistence nécessaire afin de permettre au consommateur un choix libre. La flexibilité dans l'itinéraire technique

dû à la diminution des applications de fongicides devraient sans aucun doute être confirmées par des études agronomiques poussées en plein champs. De la même manière que pour la résistance à l'herbicide ou aux insectes, les dynamiques de résistances possibles des souches de mildiou devraient être étudiées avec soin avant toute culture. Cela de manière à pouvoir optimiser la durabilité dans le temps de ces lignées. L'application stricte des règles de rotations culturales sera également importante dans ce cadre.

La limitation de la quantité de fongicide appliqué sur les pommes de terre RM, si elle est confirmée expérimentalement, serait un avantage très net qui se reflète sur la dimension environnementale (Figure 6). Cette diminution de l'usage de pesticide a pour conséquence mécanique une amélioration des sols et une diminution de la production de gaz à effet de serre, ce qui va également dans une bonne direction en termes de durabilité. On souligne néanmoins le manque de données en ce qui concerne l'effet de l'introgression du gène de résistance sur le métabolisme de la pomme de terre finale et également sur les micro-organismes associés à la plante. Un certain nombre d'études tant en milieu confiné qu'en plein champ seraient encore nécessaire pour pouvoir ajuster notre évaluation.

Figure 6. Evaluation de la pomme de terre résistante au mildiou.



3.4 Pomme *Gala* résistante à la tavelure et au feu bactérien (RTFB)

3.4.1 Introduction

En 2012, la pomiculture suisse couvre 4'138 ha de surface agricole utile (environ 0,4 % de la surface agricole utile totale). Avec près de 15 kg par habitant et par an, la pomme est le fruit le plus consommé en Suisse (OFAG, 2013). Mais les pommes sont sujettes à de nombreuses maladies, ce qui fait que la pomiculture est l'une des cultures nécessitant le plus de pesticides. En Suisse, la tavelure (maladie due au champignon *Venturia inequalis)* et le feu bactérien (infection bactérienne causée par *Erwinia amylovora)* sont des maladies particulièrement impactantes. Bien qu'il existe des variétés de pommes résistantes à ces agents pathogènes, les variétés les plus cultivées actuellement ne sont résistantes ni à l'une ni à l'autre. Les variétés les plus robustes, qui contiennent des gènes de résistance sont souvent difficiles à commercialiser. En effet, l'acceptation des consommateurs est le principal critère pour les chances de succès sur le marché d'une nouvelle variété (Eigenmann et al., 2005). Elle dépend de diverses propriétés comme la fermeté, la teneur en sucre, l'acidité et de la combinaison de ces propriétés, ainsi que d'autres facteurs, comme l'aspect (Baumgartner et al., 2007).

Le professeur Gessler de l'EPF de Zurich a développé des pommiers résistants à la tavelure et au feu bactérien en collaboration avec des partenaires internationaux. Deux gènes de résistance à la tavelure (*HcfVf2/Rvi6* et *Rvi15*) et un gène de résistance au feu bactérien (*FB_MR5*) ont été intégrés dans certaines lignées de pommes Gala. Les gènes de résistance ont été isolés sur des pommiers sauvages et leur capacité à transmettre cette résistance testée (Broggini et al., 2014, Krens et al., 2015, Vanblaere et al., 2011). Dans ces lignées, l'expression du gène de résistance est contrôlée par des séquences natives : on dit que ces sont des lignées *cis*geniques. La cisgénèse a été proposée comme alternative à la transgénèse en n'utilisant seulement des fragments d'ADN d'espèces qui pourrait théoriquement s'autoféconder. Il est important de noter que jusqu'à ce qu'une telle pomme soit développée et commercialisable, il faudra attendre encore de nombreuses années. La cisgénèse permettrait cependant un raccourcissement de la durée de développement de nouvelles variétés. Depuis le départ à la retraite du professeur Gessler en avril 2014, ces recherches sont poursuivies par Agroscope, particulièrement sur les aspects de durabilité des résistances identifiées (voir encadré).

Développement de résistances de la tavelure et du feu bactérien contre les pommes RTFB
Le développement de résistance des organismes cibles est la faiblesse principale de l'utilisation future des pommes RTFB. Pour la pomme, on connaît divers gènes de résistance contre le champignon de la tavelure *Venturia inaequalis* (Gessler et al., 2006). Le mécanisme de résistance des variétés de pommes résistantes à la tavelure déjà cultivées actuellement (par exemple variétés Florina et Topaz) se base sur une résistance qui utilise des gènes « R » qui proviennent de la pomme sauvage *Malus floribunda*. Le gène *Rvi6* (anciennement *HcrVf2*), a été utilisé pour créer une lignée Gala cisgénique (Jänsch et al., 2013). Dans les essais en plein champ, cette lignée Gala présente une résistance élevée à la tavelure. Dans le cas du feu bactérien, causé par *Erwinia amylovora,* FB_MR5 confère une résistance de type « gene-to-gene » aux pommes Gala à ces bactéries. Ce gène a également été utilisé pour la création de lignées de pommes Gala cisgéniques testées en serre et en cours de demande d'autorisation pour des tests en plein champ.
Lorsque la résistance est exprimée par un seul gène (résistance monogénique), celle-ci finit rapidement par être contournée (Szankowski et al., 2009, Vogt et al., 2013). Ce phénomène est difficile à prédire car cela dépend de plusieurs facteurs, tels que le volume de culture et la pression de sélection exercée par la variété résistante sur le champignon ou sur la bactérie. La résistance transmise par le gène *Rvi6* a effectivement déjà été surmontée par quelques populations de *V. inaequalis* (Trapman, 2006), et la résistance du cultivar exprimant *FB_MR5* a déjà été vaincue par deux souches de feu bactérien (Vogt et al., 2013). Dès lors, un pyramidage des gènes de résistances à ces deux pathogènes sera sans doute nécessaire à la résistance à long terme de la pomme Gala RTFB.

3.4.2 Scénario

La pomme Gala conventionnelle est sensible à la tavelure et au feu bactérien, alors que la pomme Gala RTFB est résistante aux deux infections. Il s'ensuit une réduction des pesticides utilisés dans la production conventionnelle de pommes Gala. Le tableau 9 résume les applications de pesticides pour les pommes Gala conventionnelle et RTFB. Les données se basent sur les hypothèses de Speiser et al. (2013).On admet une attaque moyenne de tavelure et de feu bactérien.

Tableau 9. Application de pesticides pour le contrôle de la tavelure et du feu bactérien dans les plantations de pommes en culture conventionnelle.

Système de culture	Produit	Passages, dosage (l, kg / ha)	Quantité de substance active (g / l, kg)	Co-formulants	Quantité de substance active (kg / ha)	Prix du produit (CHF/ l, kg)	Prix (quantité totale) CHF
Conv.	Delan WG	4 x 0.8	700 Dithianon	inconnu	2.24	72.2[13]	231.0
	Captan 80 WDG	3 x 2.4	800 Captan	inconnu	5.76	25.9[14]	186.5
	LMA	1 x 20	800 sulfate de potassium-aluminium	inconnu	16	11.75	235[15]
	Regalis	1 x 2.5	100 Prohexadione-calcium	inconnu	0.25	160.8[16]	401.9
	Total :				**24.38**		**1'197.9**
OGM	Delan WG	2 x 0.8	700 Dithianon	inconnu	1.12	72.2	115.5
	Captan 80 WDG	2 x 2.4	800 Captan	inconnu	3.84	25.9	124.3
	Total :				**4.96**		**239.8**

En raison des dernières adaptations du cadre juridique concernant la lutte contre le feu bactérien (OFAG, 2014a / OFAG 2014b), on postule pour la culture de pommes Gala conventionnelles une application de LMA (sulfate d'aluminium et de potassium), autorisé pour lutter contre le feu bactérien en 2014 pour une durée limitée ; il est autorisé aussi bien pour la période de floraison qu'après une averse de grêle.

En outre, les hypothèses suivantes s'appliquent :

- Toutes les autres mesures phytosanitaires restent les mêmes pour la culture de pommes Gala RTFB. Ainsi, pour les pommes Gala RTFB, les hypothèses concernant le nombre de pulvérisations sont identiques à celles de Speiser et al. (2013). On admet que pour une pression moyenne, et donc un faible taux d'infection au feu bactérien, il suffit de tailler les arbres contaminés pour guérir l'arbre.
- Il n'y a pas de différence de prix entre un jeune pommier RTFB et un jeune pommier conventionnel, car les variétés sont disponibles sans brevet et sans « taxe technologique ».
- Mesures de coexistence : pour empêcher le vol des abeilles dans les plantations de pommiers RTFB, celles-ci sont clôturées. Latéralement, la protection est assurée par des filets contre les insectes, et au niveau supérieur par les systèmes de protection contre la grêle d'usage dans les

[13] Leu+Gygax, consultable sous : http://www.leugygax.ch/inhalt_d/produkte_detail.php?id=38
[14] Leu+Gygax, consultable sous : http://www.leugygax.ch/inhalt_d/produkte_detail.php?id=30&rubrik=&anwendungsgebiet=&kulturen=&name=captan
[15] Strickhof, consultable sous : http://www.strickhof.ch/medium.php?id=228729&path=user-files/CMS/228729-neuemittel2014version11.pdf
[16] Stähler Suisse SA, consultable sous : http://www.staehler.ch/de/produkte/info/regalis-1.html

vergers de pommiers professionnels. La pollinisation à l'intérieur des vergers est assurée par des lâchers de bourdons.

- Les pommes Gala sont commercialisées en premier lieu comme pommes de table. Dans le secteur en aval de la culture, seuls les effets de la culture de pommes Gala RTFB sont pris en considération dans la chaîne de création de valeur des pommes de table. Celles-ci sont achetées et stockées par les grossistes, qui les livrent aux détaillants selon les besoins au cours de l'année. La mise en valeur de pommes sous forme de jus de pommes n'est pas prise en compte.
- Dans ce secteur, on admet qu'il n'est pas nécessaire de construire de nouvelles installations de transformation et de production, mais que les flux de produits sont séparés dans le temps et/ou dans l'espace sur différentes lignes de productions déjà existantes.

En outre, on admet que les distances de transport après la récolte jusqu'au lieu de stockage des grossistes puis des acheteurs restent inchangées.

3.4.3 Evaluation de la durabilité

3.4.3.1 Critères socio-économiques

Agriculteur – Bilan des bénéfices – Coûts variables – Rendement

La résistance au feu bactérien n'a pas d'influence sur les rendements, elle y contribue indirectement en affectant l'état de santé de l'arbre. Une diminution de la tavelure par la résistance à cette maladie permet de classer une plus grande proportion de pommes dans la catégorie de qualité supérieure. Speiser et al. (2013) n'admettent pas de différence au niveau du rendement, les taux de passage dans une classe de qualité supérieure (III → II et II → I) s'élèvent en moyenne à 0,8 % et 0,2 %. La performance en matière de rendement est aussi élevée dans les vergers de pommes conventionnelles, car les stratégies de lutte contre les pathogènes sont très efficientes.

Evaluation : 0

On ne s'attend pas à une augmentation de rendement spécifique en t/ha. Il existe un potentiel d'amélioration en cas de dégâts, lesquels ne sont pas particulièrement marqués dans ce scénario (le scénario part de l'hypothèse d'une attaque moyenne de tavelure et de feu bactérien).

Agriculteur – Bilan des bénéfices – Coûts variables – Prix de vente

Au cours des 15 dernières années, les prix des pommes aux producteurs ont chuté d'environ 20 %, mais comparativement de manière moins importante que le reste du secteur. Les prix dépendent entre autres des conditions météorologiques influant les rendements (Bitzer et al., 2012). En ce qui concerne le revenu tiré de la production de pommes, le prix des pommes de la classe la plus élevée est un facteur déterminant (Mouron et Carint, 2001). La résistance à la tavelure contribue à augmenter la proportion de pommes des classes I et II. Speiser et al. (2013) prennent pour hypothèse qu'il n'y a pas de différence de prix entre les pommes conventionnelles et les pommes génétiquement modifiées. Cette hypothèse n'a pas été reprise dans cette étude, car actuellement, on suppose une faible disposition à payer pour des pommes génétiquement modifiées.

Evaluation : 0

L'augmentation relative du prix lié à l'augmentation de la proportion de pommes de meilleures qualités dans la culture de pommes GM est compensée par une plus faible demande pour ces mêmes pommes.

Agriculteur – Bilan des bénéfices – Coûts variables – Coûts de production

Pour une année en phase de plein rendement, les différences de coûts de production pour les variétés résistantes par rapport aux variétés sensibles sont postulées comme d'après Speiser et al. (2013): coûts de main d'œuvre -5 % ; protection phytosanitaire -22 % ; coûts de production totaux -9 % ; revenu +1 % pour des prix identiques mais qualité plus élevée.

Donc, si on ne prend pas en compte les mesures de coexistence, les bénéfices et le cash-flow annuel s'améliorent si on cultive des pommes RTFB à la place de pommes conventionnelles. L'arboriculture se distingue de l'agriculture au niveau du choix de la culture qui engage sur le long terme (plusieurs dizaines d'années). Spécialement pour les pommes génétiquement modifiées, l'acceptation et la garantie de prise en charge doivent être assurées, car l'arrachage d'un verger avant la fin de la durée d'exploitation prévue est économiquement très désavantageux.

Les mesures de coexistence qui prévoient une mise sous filet des vergers de pommiers génèrent des coûts supplémentaires, même si on n'installe qu'un filet latéral en complément de la protection antigrêle actuellement en usage dans la plupart des exploitations de pommiers professionnelles (communication orale de Fruit-Union Suisse). Une pollinisation artificielle (abeilles, bourdons) dans l'enceinte du verger devra également être réalisée. Cependant, on peut imaginer que les frais d'installation élevés pourraient être amortis la durée d'exploitation du verger.

Evaluation : -2

Les mesures d'aménagement additionnelles dans les vergers ont un impact négatif sur le critère illustrant les coûts de production.

Agriculteur – Bilan des bénéfices – Coûts variables – Charge de travail

Dans l'arboriculture, la charge de travail dépend beaucoup des besoins en mesures phytosanitaires. Pour les arbres RTFB, le nombre de pulvérisations diminue et donc la charge de travail aussi. Pour la

résistance au feu bactérien, la taille nécessaire en cas d'infection devient en théorie superflu. Toutefois, cette réduction est contrebalancée par le travail supplémentaire exigé pour la mise en œuvre des mesures de coexistence.
Evaluation : 0

Agriculteur – Structures socio-économiques – Garantie de la propriété et liberté économique

Le degré de garantie de la propriété et de liberté économique est dicté par les règles de coexistence. Celles-ci doivent être adaptées à l'utilisation des OGM et ne pas être restrictives (Demont et Devos, 2008). On considère que le degré de garantie de la propriété et de la liberté économique augmente lorsque la culture d'une variété OGM est possible. Si les mesures de coexistence sont efficaces, elles permettent également aux producteurs voisins de cultiver librement ce qu'ils désirent, les pommes RTFB sont une alternative supplémentaire.
Evaluation : +1

Agriculteur – Structures socio-économiques – Acceptation au niveau local

L'acceptation des OGM au niveau des structures agricoles locales est très faible. Le sondage de Schweiger et Szerencsits (2009) réalisé parmi les agriculteurs de la région de Zurich montre que la disposition à cultiver des OGM dépend fortement d'un point déterminant : « la connaissance de l'exploitation présumée des voisins ». L'acceptation dépend aussi des conditions de responsabilités civiles en vigueur en cas de litige.

D'autres acteurs locaux concernés par la culture de plantes génétiquement modifiées sont les apiculteurs (prise de position sur le projet de coexistence d'Apisuisse, 2013). Les apiculteurs sont défavorables à la culture d'OGM parce qu'il n'est pas possible d'empêcher l'arrivée de pollen OGM dans leur miel. Toutefois, la mise sous filet totale et le recours à des bourdons dans un système fermé permet d'empêcher les vols d'abeilles entre les pommiers génétiquement modifiés et les pommiers conventionnels.
Evaluation : -1

L'acceptation locale des pommiers RTBF est plus faible que la culture conventionnelle.

Agriculteur – Structures socio-économiques – Pratiques agricoles

Les alternatives aux pesticides requièrent une réorganisation des méthodes de culture mais peuvent globalement faciliter le mode de culture (Meissle et al., 2010, Speiser et al., 2013). Les exploitations à grande surface de pommes OGM pourraient donc mieux profiter que les plus petites. Les exploitations intensives et spécialisées sont en effet plus en mesure de réduire les coûts (Speiser et al., 2013). Les modifications des pratiques agricoles laissent toutefois supposer que le savoir-faire concernant la prophylaxie des maladies pourrait se perdre et jouer sur la durabilité des résistances utilisées.
Evaluation : -1

Agribusiness – Bilan des bénéfices – Secteur amont – Capacité d'innovation

La sélection de variétés de pommes résistantes apporte une contribution indispensable à la réduction de la pollution de l'environnement par les pesticides dans l'arboriculture. Du point de vue économique, la sélection effectuée par des institutions publiques, ici l'institut des sciences en production végétale d'Agroscope Changins-Wädenswil, est sans doute la plus efficiente d'un point de vue économique (communication personnelle de Cesare Gessler). La culture de pommiers RTBF permettrait la collecte de données cruciales pour comprendre les dynamiques de résistances aux pathogènes.
Evaluation : +1

Agribusiness – Bilan des bénéfices – Domaine amont – Consommations intermédiaire (semence)

La station de recherche Agroscope Changins-Wädenswil (Institut des sciences en production végétale) ne dépose en général pas de demande de brevet, contrairement aux entreprises privées. On peut donc admettre qu'il n'y aurait pas de « taxe technologique » mais un enregistrement des variétés au catalogue de manière conventionnelle (certificat d'obtention végétale) et un accès garanti pour les sélectionneurs.
Evaluation : 0

Agribusiness – Bilan des bénéfices – Domaine amont – Consommations intermédiaires (pesticides)

La réduction de pesticides (Tableau 9) d'environ 20 kg par hectare aurait un impact négatif sur les ventes de pesticides.

Evaluation : -1

La culture d'arbres résistants fait baisser la demande en pesticides.

Agribusiness – Bilan des bénéfices – Secteur aval – Flux des produits, préservation de l'identité

Les grossistes se chargent du stockage, du tri, de l'emballage et du transport jusqu'aux détaillants. Hormis pour la vente directe, la production sur l'exploitation agricole est terminée dès que les pommes sont prêtes pour le transport, dans les conteneurs au bout des rangs. Le grossiste se charge des pommes qui sont entreposées et triées de manière échelonnée et proposées à la vente tout au long de l'année. Ce secteur a subi de fortes concentrations et les petites exploitations doivent se spécialiser sur des niches et des marchés régionaux. Les principaux postes de coûts pour les grossistes sont l'achat auprès des producteurs (~47 % des coûts), les frais d'infrastructure, de transport, de stockage, ainsi que les coûts de tri et d'emballage (Bitzer et al., 2012). Le stockage se fait dans des caisses d'environ 300 kg ; le tri et l'emballage se font immédiatement avant la livraison aux détaillants. Pour le respect des règlementations de production, il est indispensable que la traçabilité soit sans faille, ce qui est déjà le cas actuellement (communication orale de Fruit-Union Suisse).

Evaluation : 0

Comme aujourd'hui chaque pomme peut déjà être tracée jusqu'à son exploitation de départ, la dépense pour la séparation des flux de produits ne serait pas plus grande pour la production de pommes GM qui arriveraient sur le marché comme pommes de table.

Agribusiness – Bilan des bénéfices – Secteur aval – Débouchés commerciaux

D'après Bitzer et al. (2012), l'offre moyenne pluriannuelle en pommes est excédentaire, la consommation stable et les possibilités de débouchès à l'étranger sont limitées en raison des coûts de production élevés en Suisse. Les prix à la production sont négociés avec le centre de production de pommes de table et publiés. L'établissement d'une variété de pommes sur le marché est également une affaire de longue haleine. La pomme occupe en Suisse des marchés disputés et saturés: grande menace de nouveaux concurrents, grand pouvoir de négociation des fournisseurs et des acheteurs, peu de produits de remplacement, très grande rivalité dans la branche. Le consommateur apprécie une offre variée en fruits et recherche le changement ; une plus grande consommation de pommes ne pourrait se faire qu'aux dépens d'autres fruits. Il en résulte une demande accrue pour une qualité de produits élevée, incompatible avec des pommes étiquetées OGM.

Evaluation : -1

La culture de la pomme RTFB ne diminue pas les frais de production et la faible acceptation des consommateurs diminue les débouchés commerciaux.

Agribusiness – Bilan des bénéfices – Secteur aval – Impact sur l'approvisionnement

Le taux d'auto-approvisionnement pour les pommes de table est de 95 % en Suisse, tout comme celui des jus (Bitzer et al., 2012). Comme il ne faut pas s'attendre une augmentation du rendement pour les pommes résistantes, ces pommes n'accroîtront pas l'approvisionnement.

Evaluation : 0

Comme actuellement le taux d'auto-approvisionnement est déjà très élevé, il ne faut pas s'attendre à ce que la culture de pommes RTFB l'augmente.

Agribusiness – Bilan des bénéfices – Secteur aval – Bureaux et entreprises de contrôle

L'augmentation des contrôles pour la présence d'OGM bénéficient aux entreprises de contrôle.

Evaluation : +1

Agribusiness – Structures socio-économiques – Garantie de la propriété et liberté économique

L'autorisation de la culture de pommier RTFB n'aura qu'un impact limité sur la propriété et la liberté économique de la branche.

Evaluation : 0

Agribusiness – Structures socio-économiques – Effets sur les PME

La chaîne de création de valeur pour les pommes de table est relativement courte : il y a environ 50 grossistes suisses qui vont chercher les pommes de table chez les producteurs et les stockent. Il suffira probablement d'un surcroît d'attention (étiquetage des caisses) pour que les exigences spécifiques aux pommes génétiquement modifiées soient respectées, sans qu'il soit nécessaire de développer des flux de produits séparés.

Evaluation : 0

Les PME ne subiront pas de changement dû à la culture de pommes RTFB, grâce à un bon système de traçabilité déjà existant.

Agribusiness – Structures socio-économiques – Image

L'impact en termes d'image de la culture de pommes RTFB serait similaire à celui du maïs ou de la pomme de terre (voir plus haut)

Evaluation : -1

La valeur ajoutée engendrée par le renoncement généralisé aux OGM dans l'agriculture et la filière alimentaire suisses serait perdue si on cultivait des OGM en Suisse.

Consommateurs – Liberté de choix

L'interdiction des OGM a pu être considéré dans la littérature comme une limitant le choix du consommateur (Bonfadelli et al., 2007).

Evaluation : +1

La culture de pommes Gala RTFB augmentera l'éventail de choix du consommateur (même si des pommes Gala conventionnelles sont aussi disponibles).

Consommateurs – Santé

Même si les résidus de pesticides sont issus de molécules autorisées et dont l'innocuité et la quantité ont été testée, les données en plein champ manquent pour comparer leurs résidus dans les pommes RTFB. On pourrait penser que la diminution de ces résidus puisse être un argument en faveur de cette forme de cis-genèse. En l'absence de donnée disponible quant à la composition des pommes RTFB comparée à leur équivalent conventionnel, il ne nous ait possible que de spéculer sur leur potentielle innocuité. De plus, une procédure d'évaluation des risques (toxicologique) comme pour chacun des OGM autorisés devrait être effectuée par les autorités sanitaires avant toute mise sur le marché conformément à la LGG et l'ODE.

Evaluation : 0

En l'absence de donnée publiée, on postule que les pommes RTFB ne sont *a priori* pas plus nocives que leur équivalentes conventionnelles.

Consommateurs – Acceptation

Dans une enquête Eurobaromètre (2010b), il a été constaté que les plantes cisgéniques sont estimées plus positivement que les plantes transgéniques. Cette propriété pourrait devenir un argument marketing.

Evaluation : -1

L'acceptation des OGM, cis ou transgéniques par les consommateurs est faible en Suisse et la volonté de préserver une filière suisse sans OGM est forte.

Consommateurs – Niveau des prix

Le report des coûts de production et des coûts pour les mesures de séparation des flux fait monter le niveau des prix pour l'acheteur (Price et al., 2003). Les répercussions sur le prix dans le commerce de détail ne peuvent être estimées que grossièrement. D'après leurs statuts actuels, de nombreux programmes de labels excluent les OGM, ce qui fait qu'ils atteignent en moyenne un prix plus bas.

Evaluation: -1

Comme la séparation de flux de marchandises engendre des coûts élevés, on peut admettre qu'au moins une partie de ces coûts est répercutée sur les produits (OGM et sans OGM).

3.4.3.2. Critères environnementaux

Biodiversité – Conservation de la biodiversité – Espèces OEA (objectifs environnementaux pour l'agriculture)

La culture de pommes Gala RTFB requiert moins de pulvérisations de pesticides que la culture de pommes Gala conventionnelles (Tableau 9). Les substances actives utilisées (dithianon, captan, prohexadione) ont des toxicités aiguë modérée à forte sur les oiseaux, les reptiles, les mammifères, les poissons, les amphibiens, les mollusques ainsi que sur les insectes comme les abeilles (Geiger et al., 2010, Kegley et al., 2010a & b). Peu ou pas de données sont disponibles pour le LMA. On note que l'effet de la réduction des pulvérisations lors de la culture de pomme RTFB sur la faune n'est pas documentée. Les autres substances (herbicides...) sont utilisées de manière comparable.

L'emploi de pesticides et d'engrais inorganique dans les vergers a des répercutions complexes sur les écosystèmes, particulièrement sur les mousses et les lichens (NECR090, 2014, Ruoss, 1000, Mc Cune et al., 2006).

Il est réaliste de supposer que les arboriculteurs seront plus enclins à tolérer des espèces sensibles au feu bactérien aux alentours de leurs vergers si ces derniers sont résistants à cette maladie (Speiser et al., 2013).

Evaluation : +1

L'impact de la culture de pommier RTFB (i.e. diminution de l'application de pesticides) est logiquement estimé comme ayant un impact positif sur les espèces OAE, mais ici encore, des données expérimentales en plein champ seraient nécessaires afin de supporter cette hypothèse.

Biodiversité – Conservation de la biodiversité – Flux génétique sur des plantes sauvages apparentées et invasivité dans les habitats naturels

La pollinisation de pommes sauvages (*M. sylvestris*) par le pollen de variétés de pommes commerciales est possible et les hybrides sont extrêmement fréquents (Sweet et Bartsch, 2012). Les espèces des genres *Sorbus* et *Pyrus* sont aussi d'éventuels partenaires de croisement de la pomme, et pour les deux genres, il existe des espèces sauvages indigènes en Suisse, mais ces hybrides ne survivent que rarement. La résistance au feu bactérien peut conférer un avantage aux pommes Gala résistantes par rapport aux pommes conventionnelles sensibles et aux pommes sauvages (Speiser et al., 2013) ; les pommes Gala RTFB pourraient donc théoriquement être plus invasives que les pommes Gala conventionnelles. Par contre, on ne s'attend pas à ce que la résistance à la tavelure puisse offrir un avantage similaire.

Evaluation : 0

Si les mesures de coexistence sont respectées, la probabilité d'un transfert vertical du transgène sur des espèces sauvages apparentées est considérée comme extrêmement faible, ce qui fait que pour ce critère, la probabilité de flux génétique est négligeable et équivalente aux pommes conventionnelles.

Biodiversité – Fonctions écosystémiques – Pollinisateurs

Impacts de la réduction de l'application de fongicides comparables à celui de la culture de pomme de terre RM (voir plus haut).

Evaluation : 0

On estime ici que culture de pommes RTFB est jugée équivalente à celle pour la culture de pommes conventionnelles, bien que des données supplémentaires seraient nécessaires pour une évaluation plus exacte.

Biodiversité – Fonctions écosystémiques – Lutte antiparasitaire naturelle

Les fongicides utilisés dans la culture des pommiers (dithianon, captan et prohexadione) sont nocifs à différents degrés pour *Typhlodromus pyri, Aphidius rhopalosiphi* et certains champignons entomopathogènes (Cuthbertson et Murchie, 2003, CESAR, 2014, APVMA, 2006, Sapieha-Waszkiewicz et al., 2004, Shah et al., 2014).

Evaluation : +1

La culture de pommes RTFB limite les impacts négatifs des fongicides sur les populations d'auxiliaires utilisés en lutte biologique.

Biodiversité – Fonctions écosystémiques – Fonctions dans l'écosystème sol

En général, il est considéré que les fongicides ont une influence directe sur les organismes du sol (Bünemann et al., 2006, Riah et al., 2014), ce qui change les propriétés de fixation de l'azote et du carbone du sol par une action directe (champignons) et indirecte (bactéries) (Yang et al., 2011, Piotrowska et al., 2008). Le LMA a une toxicité chronique faible pour les vers de terre (Oker-Chemie Sarl, 2013).

Cependant, en l'absence de données en plein champ, la variation possible de diversité microbienne (Griffits et al., 2001, Wertz et al., 2007) ne permet pas de conclure sur l'altération éventuelle au niveau écosystémique (Imfeld et Vuilleumier 2012).

Evaluation : 0

En l'absence de donnée disponible, on postule que malgré une baisse de l'emploi de pesticides, les fonctions de l'écosystème du sol sont les mêmes dans les deux systèmes de culture.

On note que la réduction des quantités de substances actives épandues dans la culture de pommes RTFB est prise en compte dans le critère « *Qualité environnementale* » et n'est pas intégrée ici.

Biodiversité – Fonctions écosystémiques – Fonctions dans l'écosystème eau

La diminution de substances actives dans la culture de pommier RTFB permet une résilience plus grande des écosystèmes de l'eau, même si les conditions légales d'applications sont censées prévenir qu'aucun dégât ne soit fait à ces écosystèmes. Cependant, en l'absence de donnée disponible, on considère que les deux systèmes de culture sont équivalents.

Evaluation : 0

On note que la réduction des quantités de substances actives épandues dans la culture de pommes Gala RTFB est prise en compte dans le critère « *Qualité environnementale en eau* » et n'est pas intégrée dans l'évaluation du critère Fonctions dans l'écosystème eau.

Qualité environnementale – Air – Gaz à effet de serre – Dioxyde de carbone

Dans la culture de pommes Gala RTFB, on économise six passages d'épandage de fongicides (on passe de 28 à 22 épandages). Les distances de transport restent inchangées.

Evaluation : +1

La diminution de la consommation de carburant dans les vergers permet de réduire les émissions de CO_2 dans la culture de pommes Gala RTFB.

Qualité environnementale – Air – Polluants atmosphériques – Ammoniac

Evaluation : 0

La culture de pommes Gala RTFB n'a pas d'influence sur les rejets d'ammoniac, car la gestion des engrais reste la même que pour la culture conventionnelle.

Qualité environnementale – Air – Polluants atmosphériques – Oxydes d'azote

Evaluation : +1

Comme pour le CO_2.

Qualité environnementale – Air – Polluants atmosphériques – Suie de diesel

Evaluation : +1

Comme pour le CO_2.

Qualité environnementale – Eau – Engrais

Evaluation : 0

Pas de modification dans la gestion des engrais.

Qualité environnementale – Eau – Pesticides

Evaluation : +1

Comme détaillé pour les critères « espèces AOE » et « écosystèmes de l'eau et du sol », la culture de pommier RTFB est censée consommer moins de fongicides que la culture conventionnelle (Tableau 9).

Qualité environnementale – Sol – Charge physique – Erosion
Evaluation : 0
Pas de changement de l'itinéraire technique suivi pouvant résulter d'un changement dans l'érosion du sol.

Qualité environnementale – Sol – Charge physique – Compactage
Evaluation : +1
La diminution du nombre d'épandage de fongicide dans le champ permet de limiter le compactage du sol.

Qualité environnementale – Sol – Pollution chimique – Engrais
Evaluation : 0
Pas de modification dans la gestion des engrais.

Qualité environnementale – Sol – Pollution chimique – Pesticides
Evaluation : +1
La diminution de l'application de pesticides dans la culture de la pomme RTFB diminue la pollution du sol. Il en résulte un critère de durabilité jugé légèrement plus élevé.

Besoins en eau – Eau
Evaluation : 0
Comparée à la culture de pommes Gala conventionnelles, la culture de pommes Gala RTFB n'a pas d'influence sur l'utilisation de la ressource eau dans les vergers de pommiers.

Besoins en ressources – Energie
Evaluation : +1
La diminution du nombre d'épandage et le fait que la filière soit déjà parfaitement prête à appliquer un étiquetage et une séparation des flux de marchandises rend ce critère positif pour la culture de la pomme RTFB.

Besoins en ressources – Terrain
Evaluation : 0
Comparée à la culture conventionnelle, celle de pommes Gala RTFB n'a pas d0impact sur l'utilisation de surface agricole.

Besoins en ressources – Pesticides
Evaluation : +2
La diminution théorique de substances actives utilisée (Tableau 9) dans la culture de pommiers RTFB a un impact positif sur ce critère.

Besoins en ressources – Engrais
Evaluation : 0
Pas de modification dans la gestion des engrais

3.4.4. Synthèse de l'analyse de durabilité pour la pomme RTFB

L'impact environnemental principal de la culture de la pomme RTFB réside dans la diminution théorique des substances actives appliquées : principalement fongicides et antibactériens, ce qui se répercute logiquement sur l'utilisation des ressources (Figure 7), comme c'était le cas pour les trois autres cultures étudiées. De manière surprenante, le modèle montre une durabilité plus faible à la fois pour les agriculteurs et pour les consommateurs lors de la culture de pommier RTFB. Il est important de noter que le manque d'acceptation des organismes cisgéniques, comme transgéniques est à l'origine de ce manque de durabilité socio-économique. Cependant, il paraît évident à la vue de nos résultats, que de nombreuses données sont manquantes, surtout les données relatives aux critères environnementaux. Des études supplémentaires avec des pommiers conventionnels seraient nécessaires. En effet, l'impact

du changement d'itinéraire technique, par exemple la réduction de l'application de fongicide sur les écosystèmes du verger ne sont que peu voire pas documentés.

Le modèle MCDA n'a que peu d'utilité en ce qui concerne l'évaluation de durabilité (Bohanec et al., 2008). Dès lors, les conclusions tirées de cette analyse comparative du pommier RTFB sont limitées en terme prospectif. En effet, la durabilité des résistances en plein champ est très difficilement prévisible. Cet aspect mériterait également de plus amples études, de même que l'impact réel de « l'empilement » de plusieurs gènes de résistances sur la durabilité de ces résistances, tant au niveau de la tavelure que du feu bactérien. Finalement, on sait qu'en Suisse, les méthodes de gestion du feu bactérien sont en pleines évolutions et que le recours temporaire à certains antibiotiques est désormais interdit. Les méthodes prophylactiques de lutte contre la tavelure en combinaison avec des méthodes de lutte « génétiques » du type de celles exposées ici restent à développer.

Figure 7. Evaluation des pommes Gala RTFB.

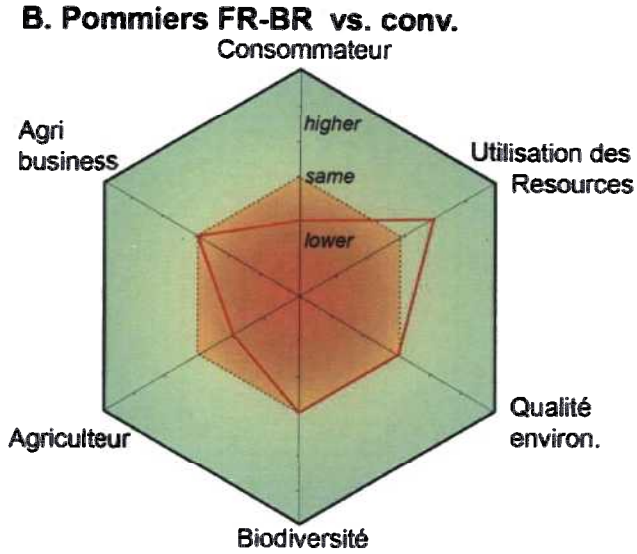


Tableau 10. Evaluation de six systèmes de culture contentant des OGM en comparaison avec leur équivalent conventionnel. Une échelle utilisant cinq niveaux a été utilisée: -2, beaucoup plus faible; -1, faible; 0, égale; 1, meilleure; 2, bien meilleure durabilité pour les systèmes OGM que conventionnels. Les scenarios sont décrit en detail dans le Tableau 1.

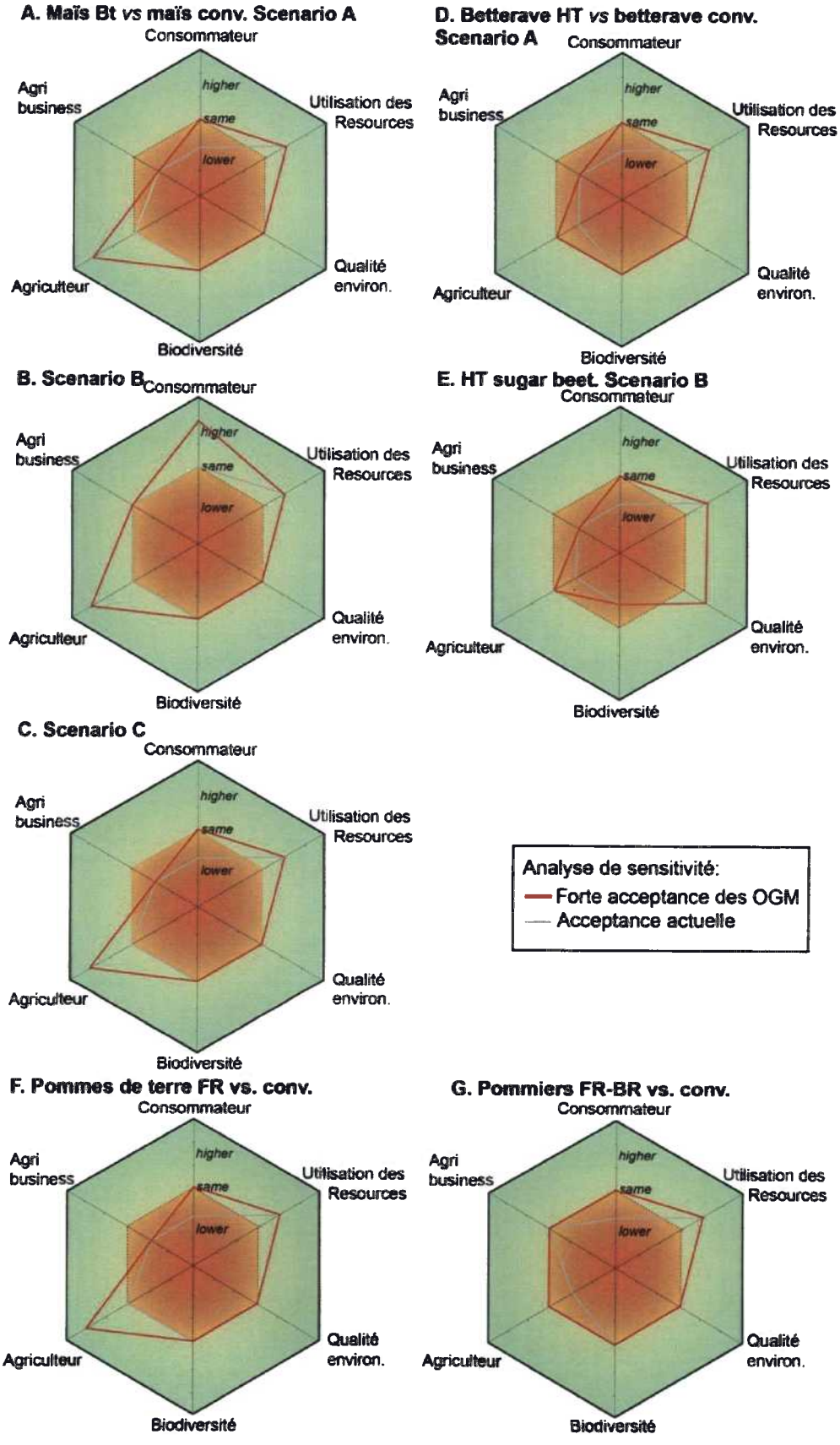
	Bt Maize A	Bt Maize B	Bt Maize C	HT Beetroot A	HT Beetroot B	FR Potato	FR BR Apple
Critères socio-économiques							
Rendement	0	0	1	1	1	0	0
Prix de vente	-1	0	-1	-1	-1	-1	0
Coûts de production	-1	1	-1	1	1	-1	0
Charge de travail	-1	-1	-1	0	0	0	0
Indépendance économique	1	1	1	1	1	1	1
Acceptation locale	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Pratiques agricoles	0	0	0	-1	-1	0	-1
Innovation	1	1	1	1	1	1	1
Sélection des semences	-1	-1	-1	0	0	0	0
Pesticides/engrais	0	0	-1	-1	-1	-1	-1
Flux des produits	-2	0	-2	-2	-2	-2	0
Marchés	-1	0	-1	-1	-1	-1	-1
Impyct sur l'approvisionnement	0	0	0	0	0	0	0
Contrôles	1	1	1	1	1	1	1
Indépendance économique	0	0	0	0	0	0	0
Effets sur les PME	-1	0	-1	-1	-1	-1	0
Image/Réputation	-1	-1	-1	-2	-2	-1	-1
Liberté de choix	1	0	1	1	1	1	1
Impact sanitaire	0	0	0	0	0	0	0
Acceptation	-1	0	-1	-2	-2	-1	-1
Prix d'achat	-1	0	-1	-1	-1	-1	-1
Critères environnementaux							
Espèces protégées	0	0	0	-1	-1	1	1
Flux génétiques	0	0	0	0	0	0	0
Invasivité	0	0	0	0	-1	0	0
Pollinisateurs	0	0	0	-1	-1	0	0
Lutte biologique	0	0	0	-1	0	1	1
Ecosystèmes des sols	0	0	0	0	0	0	0
Ecosystèmes de l'eau	0	0	0	0	1	0	0
Emissions de CO_2	-1	0	0	1	0	1	1
Emissions de N_2O	0	0	0	0	0	0	0
Volatilisation engrais/pesticides	0	0	0	0	1	1	0
Diesel	-1	0	0	1	0	1	1
Runoffs pesticides	0	0	0	0	2	0	0
Runoffs engrais	0	0	1	1	0	1	1
Risques d'érosion	0	0	0	0	1	0	0
Risques de compactage	0	0	0	1	0	1	1
Pesticides	1	-1	1	1	2	1	2
Engrais	0	0	0	0	0	0	0
Eau	0	0	0	0	0	0	0
Energie	-1	0	0	-2	-2	-1	1
Sols	0	0	1	1	1	0	0

3.5 Etude de sensibilité du modèle

Après avoir comparé les sept systèmes de culture OGM à leur équivalent conventionnel, une des constantes observées étaient la faible durabilité socio-économique due en grande partie à la faible acceptation des OGM. De manière à estimer avec plus de précision quelles sont les influences de la variation de l'acceptation sur la durabilité des systèmes de culture, nous avons effectué une étude de sensibilité du modèle (Figure 8). En utilisant des paramètres différents que ceux implémentés dans le modèle lors de la consultation avec les différentes parties prenantes, nous avons postulé une acceptation maximale des OGM de la part des consommateurs et des agriculteurs. Il en ressort que dans ces conditions, le maïs Bt et les pommes de terre RM seraient plus avantageuses pour les agriculteurs, mais que les pommiers et les betteraves OGM n'apporteraient que des augmentations de durabilité minimes.

Bien que spéculative, cette analyse montre à quel point il est essentiel d'avoir, en amont de la culture des OGM, une acceptation du consommateur et de l'agriculteur, si l'on veut utiliser les biotechnologies vertes. Ces deux groupes n'ont bien sûr pas les mêmes perspectives vis-à-vis des produits agricoles, comme illustré dans la structure du modèle MCDA (Figure 2 et 3) et une définition des exigences de chacun de ces groupes est nécessaire pour garantir la viabilité éventuelle de n'importe quel OGM existant ou en développement. Cette analyse complémentaire reflète le haut niveau d'exigences de chacun des groupes concernés et l'état de forte polarisation du débat entourant les biotechnologies vertes. En résumant ici les coûts et les bénéfices à l'aide du modèle, on pourra dégager les grandes lignes et les exigences nécessaires afin de conserver la durabilité de l'intégralité de l'agrosystème.

Figure 8. Résumé des variations des différentes composantes de la durabilité en fonction de la variation théorique de l'acceptation des OGM par l'ensemble des acteurs.



4 Discussion

4.1 La distinction entre durabilité à court et long terme est cruciale

L'analyse *ex ante* des agrosystèmes incluant des OGM a permis de mettre en place un outil de diagnostic rapide basé sur l'analyse de décision (ADMC). Ce modèle permet d'évaluer l'impact potentiel de n'importe quel OGM dans un contexte socio-économique et environnemental bien particulier : celui des agrosystèmes suisses. Il a été construit puis implémenté en combinant des données publiées et des expertises des différentes parties concernées (voir remerciements). Même le design de l'arborescence a également été le fruit de multiples consultations mais on peut penser qu'une telle méthode puisse également être adaptable à d'autres agrosystèmes, européens en particulier. La puissance de ce type d'approche est de permettre l'assemblage de données quantitatives et qualitatives afin d'informer les deux grandes composantes de la durabilité, à la fois socio-économiques (parfois considérées séparément, Lichtfouse et al., 2009) et environnementales (Raymond Park et al., 2011).

Deux autres études ont été effectuées sur l'impact éventuel de l'introduction d'OGM en Suisse : une revue compréhensive entreprise par l'institut de recherche de l'agriculture biologique (Speiser et al., 2013) et un rapport de l'académie des sciences suisses (SCNAT, 2013). Au-delà de l'innovation méthodologique que nous apportons ici, les grandes lignes des conclusions de ces deux études corroborent les conclusions présentées ici. Certains points, comme les niveaux d'acceptation des consommateurs ou certains niveaux d'impacts environnementaux diffèrent, ce qui illustre bien l'importance du contexte et de la prise en compte de divers points de vue dans les études coûts/bénéfices. L'objectif de ce rapport a été de tenir en compte le plus grand nombre de parties concernées (stakeholders) et de ne pas favoriser l'un acteur plutôt que l'autre. Il est évident que le même modèle pourra être utilisé en adaptant l'arborescence suivant les priorités et les objectifs propre à chacun de ces acteurs.

Une des limites de l'utilisation du modèle MCDA dans ce contexte réside dans le fait qu'il rend compte d'un système à un moment précis et ne permet que difficilement d'évaluer l'évolution de ces agrosystèmes à long terme (Bohanec et al., 2008). Par exemple, le maintien de systèmes de rotations des cultures est très fortement implémenté en Suisse dans les plans de subventions à l'agriculture (paiements directs), et l'influence de la mise en culture d'OGM sur certaines parcelles rend incertaine les modifications de ces pratiques, comme très bien illustré dans Speiser et al., 2013. De plus, l'autorisation éventuelle en Suisse ne se ferait que dans des zones délimitées par les règles de coexistence en place, rendant encore plus incertain les choix réel de l'agriculteur en terme de rotations possibles au sein de ces zones. De la même manière, les quatre grands types de résistances utilisées dans les scénarios testés dans cette étude (résistance aux lépidoptères, aux herbicides, aux champignons et aux bactéries) ont toutes montré leur limite en termes de durabilité (Brookes & Barfoot, 2013, Vogt et al., 2013, Fahrentrapp et al., 2013, Jin et al., 2015). En particulier, les systèmes Bt, bien qu'ayant montré certains avantages économiques et environnementaux (Hutchison et al., 2010, Lu et al., 2012, Edgerton et al., 2012), ont aussi vu leur efficacité réduite après l'apparition de résistances aux toxines insecticides (Tabshnik et al., 2009, Gassmann et al., 2011). Historiquement, les problèmes de résistance à la toxine Bt ont été très tôt pris en compte (Tabashnik et al., 1994). Ces résistances ont été intégrées aux programmes de développement des agroindustriels qui utilisent désormais des plantes exprimant plusieurs variants de la toxine (13 différentes protéines Bt ont été approuvées à ce jour aux Etats-Unis (Meissle et al., 2011, Abbas et al., 2013). L'utilisation de refuges naturels afin d'équilibrer les pressions sur les ravageurs a également été préconisée (Jin et al., 2015), mais également accompagnée d'une augmentation dans le temps de la quantité d'insecticides de synthèse utilisée.

En ce qui concerne les plantes tolérantes aux herbicides, l'occurrence de résistance aux herbicides est bien établie, avec 44 espèces résistantes au glyphosate appartenant à 10 familles de plantes différentes (Green, 2014). Plusieurs stratégies rendant les plantes tolérantes au glyphosate (mutation de l'ESPS, surexpression de l'ESPS, acétylation du glyphosate) sont utilisées, mais ne sont vraisemblablement pas plus durables. Plusieurs autres combinaisons herbicides/tolérances sont utilisées simultanément (glufosinate, dicamba, sulfonylurées...). L'augmentation de l'utilisation de ces herbicides (pour la plupart déjà utilisés depuis des décennies et avec des résistantes connues) pourrait faire survenir de

nouveaux problèmes en termes de sécurité sanitaire. D'autre part, certaines résistances aux pathogènes montrent également leurs limites. La résistance au feu bactérien conférée par le gène *FB_MR5* utilisée dans notre modèle a déjà été rendue caduque par une simple mutation ponctuelle (Vogt et al., 2013). En réponse, « l'empilage » de différents gènes a été proposé (Broggini et al., 2015).

On note que cette analyse se concentre sur des traits monogéniques et la combinaison de multiples résistances tant aux insectes qu'aux herbicides (type maïs « Smartstax ») n'a pas été implémentée car leur utilisation a été jugée très improbable dans un futur proche en Suisse. Pourtant, il est important de noter qu'il serait indispensable d'accompagner chaque déploiement de telles lignées avec une stratégie de gestion compréhensive (rotations, refuges naturels, monitoring des adventices et des résistances) afin de garantir une durabilité maximale à ces systèmes. Loin d'être des solutions absolues et définitives, l'utilisation à grande échelle d'OGM de première génération (c'est-à-dire présentant essentiellement des propriétés agronomiques) sur d'autres continents a montré à de multiples reprises ses potentiels et ses limites (Fernandez-Corejo et al., 2014). La complexité des interactions hôtes/pathogènes nécessite 1) un effort de recherche coordonné pour comprendre les mécanismes utilisés et leur durabilité dans le temps, 2) une approche personnalisé (et locale) de la gestion des résistances et des solutions génétiques qui y sont associées, 3) une gestion précise et rapide des évolutions des agrosystèmes.

4.2 La durabilité impactée par la coexistence

Les mesures de coexistence visent à garantir la séparation des produits agricoles et des flux de marchandises afin de 1) protéger l'environnement, 2) protéger la liberté de choix des consommateurs et 3) assurer la réversibilité et un cadre légal de responsabilité civile en cas de dommages éventuels causés par les OGM. Les mesures exactes qui assureront la coexistence sont en cours d'élaboration et suive les travaux en cours en Europe depuis une dizaine d'années (Messean et al., 2006). Notre étude a mis en évidence que la mise en place d'une nouvelle filière propre aux OGM (qui est sur certains points comparable à la coexistence entre conventionnel et biologique) a des impacts souvent négatifs sur la durabilité socio-économique. Il est néanmoins important d'insister sur la difficulté, malgré les données publiées et les différentes consultations d'experts, de déterminer le seuil à partir duquel il serait économiquement viable d'utiliser une variété OGM pour les agriculteurs (Messean et al., 2006). Pour les céréales, un surcoût de 5-15% a été modélisé afin de garder un seuil maximal de 0.9% de contamination au-delà duquel un étiquetage est nécessaire. (Messean et al., 2006, Menrad et al., 2009, Albisser Vögeli et al., 2011). De la même manière, la distance de séparation entre cultures de maïs OGM et sauvages a été un point vivement discuté et souvent, au-delà de toute justification scientifique, utilisée comme un outil visant à moduler et implémenter une politique précise (Devos et al., 2009). Dans cette analyse, les éléments qui devraient constituer la coexistence sont dépendant de chaque culture et ainsi que des structures en amont et en aval de celle-ci. Plusieurs éléments clés modifient l'impact de la coexistence sur la viabilité des cultures : les tests supplémentaires, l'étiquetage, nouvelles stratégies de gestion des marchandises (machines dédiées)...

Il en résulte que, dans l'optique de préserver en particulier la liberté de choix des consommateurs, un cadre légal de coexistence clair et strict adapté à chaque culture devra être implémenté avant que toute culture OGM ne soit possible et viable en Suisse.

5 Conclusions

Dans cette étude, nous avons établi une méthode d'évaluation de la durabilité des plantes génétiquement modifiées en Suisse, en réponse à la disposition transitoire de la modification du 22 mars 2013 (LAgr, Art 187d). Cette méthode permet de dresser un diagnostic rapide et précis des impacts éventuels des OGM sur l'agrosystème suisse. Basé sur la littérature scientifique actuelle et de multiples consultations avec les parties concernées, un modèle d'analyse multi-critère a été établi. Quatre plantes dont la culture est stratégique pour l'agriculture suisse dans sept scénarios différents ont été modelisés et testés en comparaison aux systèmes conventionnels. La durabilité socio-économique et environnementale dans chacun des sept scénarios a été évaluée.

Les conclusions principales de l'analyse révèlent que les OGM testés pourraient apporter un bénéfice environnement principalement en limitant la quantité de pesticide utilisée comparée à une culture conventionnelle. Par contre la durabilité socio-économique est faible dans six des sept scénarios implémentés, principalement à cause de la faible acceptation des OGM par les agriculteurs et les consommateurs et par les mesures de coexistence liées à ces cultures. A l'heure actuelle, la culture de maïs Bt (type MON810), betterave HT (Type H7-1) ne serait pas viable pour les filières suisses, et les pommes de terre RM et pommiers RTFB n'en sont encore qu'à des stades de recherche et pas disponibles sur le marché (Figure 8). Ces OGM sont tous considérés comme des OGM de première génération, par transgénèse classique et visant des critères agronomiques précis. Typiquement, les traits HT et Bt ont été développé dans un cadre d'agriculture intensive sur des surfaces utiles de plusieurs centaines d'hectares et ont été pensés en vue de faciliter (flexibiliser) les itinéraires techniques. Il est donc peu surprenant que ces deux types d'évènements rapportés au système suisse (dont la taille moyenne des exploitations est 17 ha, OFAG, 2014), ne soient pas adaptés et en résultent des avantages socio-économiques et environnementaux marginaux (Speiser et al., 2013).

Toutefois, les limites des systèmes Bt et HT montrées par ce modèle donnent un aperçu quelque peu restrictif des potentialités des biotechnologies (bien que reflétant parfaitement l'offre commerciale actuelle). On assiste récemment à une multiplication de la recherche et du développement orientés vers des traits non plus seulement orientés vers une stabilisation des rendements mais visant à une amélioration qualitative des récoltes : blé sans gluten, biofortification du riz en micronutriments (provitamine A, fer ou zinc), pommes de terre sans acrylamide, pommes ne changeant pas de couleur quand elles s'oxydent... On peut imaginer que si les consommateurs et/ou les distributeurs perçoivent un avantage qualitatif qui permettrait une plus-value marchande significative, la pression en aval pour leur culture serait plus importante. Le manque d'acceptation des OGM dans le domaine de l'agriculture qui se contraste avec une relative indifférence (voire opinions positives) dans leur emploi répandu dans le domaine médical (« red biotechnology ») est un facteur déterminant de la viabilité des OGM en agriculture. Plusieurs facteurs supplémentaires interviennent dans le refus des populations européennes en amont du débat sur leur utilité dans l'agriculture, par exemple un manque de concensus scientifique sur l'innocuité sanitaire des OGM et des pesticides qui y sont associés (Hilbeck et al., 2015) et un rapport de méfiance généralisée par rapport aux risques des technosciences modernes (Bonneuil & Joly, 2013, Habermas, 1968).

Un des points qui n'a pas été abordé dans cette étude qui a récemment émergé est l'apparition d'une nouvelle génération d'organismes transgéniques (issus de techniques d'éditions du génome) dont l'essor est exponentiel (Ledford, 2015). Alors que l'insertion du transgène ou les mutations induites se faisaient au hasard dans les premières générations d'OGM, les organismes issus de ces nouvelles technologies permettent l'insertion dans le génome à des localisations précises et prédéfinies. Ces technologies associées aux capacités toujours grandissantes de lire (« next generation sequencing ») et d'écrire (biologie synthétique) l'ADN verront les potentialités de ces techniques progresser de manière exponentielle dans les prochaines années. Deux principaux problèmes majeurs sont liés à ces nouveaux traits : leur statut légal et leur traçabilité. En effet, en raison de leur rapide développement, le cadre légal existant tant en Europe (directive 2001/18CE) qu'en Suisse (LGG, 814.91) ne sera très probablement plus adapté. En raison de l'état de la recherche, de ces incertitudes et de l'impossibilité dans le cadre actuel des connaissances de détecter la plupart des évènements issus de ces techniques, nous avons préféré nous en tenir aux OGM de première génération. Le modèle présenté ici pourra éventuellement être appliqué à des cas concrets également issus de ces nouvelles générations d'OGM.

Figure 9. Exemples de cultures OGM développées et testées en Suisse : A. pommiers cisgéniques résistant au feu bactérien et B. essai en plein champ de pommes de terre résistantes au mildiou sur le site protégé d'Agroscope. Photos Agroscope Reckenholz.

A.

B.

Un des points clé du débat sur la durabilité des OGM, tant en termes d'acceptation que d'accès aux technologies est leur statut vis-à-vis de la législation qui encadre la propriété intellectuelle. En effet, aussi bien le maïs Bt que la betterave HT sont protégés par deux régimes de propriétés intellectuelles : le certificat d'obtention végétale conforme aux règles de l'UPOV91 en vigueur en Suisse et protège la variété végétale, et un brevet protégeant le système de résistance aux insectes ou de tolérance aux herbicides respectivement. Or, le pommier RTFB développé par des organismes publics (EPF Zürich et Agroscope) ne serait pas couvert par ces brevets et donc serait théoriquement disponible en libre accès aux sélectionneurs et aux agriculteurs. La clarification des statuts des OGM en tant que produits issus de techniques brevetées, mais aussi en tant qu'objets brevetables (voir le cas du brevet du melon, European Patent Office) pourraient permettre 1) une augmentation de l'acceptation des biotechnologies par les consommateurs comme n'étant pas l'apanage d'oligopoles industrielles, 2) permettre un accès décentralisé plus orienté vers les utilisateurs primaires (les agriculteurs).

Nous pouvons conclure que sans un développement adapté au contexte et aux problématiques des agrosystèmes suisse, conciliant à la fois les besoins des agriculteurs et les exigences des consommateurs, les biotechnologies vertes actuelles ont peu de chances d'être viables en Suisse (Baur & Nitsch, 2013). C'est en celà que l'exemple du pommier RTFB développé par Agroscope semble prometteur, malgré la relative faible durabilité du trait évaluée. Dans ce contexte, il est crucial de conserver et d'encourager des programmes de recherche transparents et centrés sur les problématiques locales accompagné de programmes de sélections variétales modernes (SCNAT, 2013). De multiples problèmes agronomiques requièrent des solutions adaptées : contrôle des pathogènes et maladies, tolérance aux stress abiotiques (sécheresse) et aux changements climatiques, pollution aux métaux lourds, qualité des récoltes et durabilité environnementale par exemple. La pomme RTFB ou le blé résistant au mildiou (Brunner et al., 2012) sont de bons exemples de réponses précises à des problématiques clés. Bien qu'interdit formellement dans la plupart des labels existants (IP, bio), l'utilisation des biotechnologies dans des systèmes agricoles non intensifs a été proposée en de multiples occasions (Kahane et al., 2013, Jacobsen et al., 2013, Andersen et al., 2015, Palmgren et al., 2015, Jacobsen et al., 2015).

Au-delà des clivages entre partisans et opposants au génie génétique, la question se pose de savoir s'il n'est pas important de reconsidérer le rôle que l'on pourrait faire jouer à la boîte à outils génétique dans l'agriculture suisse de demain : l'association de ces techniques à des systèmes de productions à faible intrants ou biologiques pourrait permettre d'établir un régime novateur et durable d'agriculture.

6 Remerciements

Nos remerciements vont tout d'abord aux nombreux acteurs et experts qui se sont montrés prêts à répondre à nos questions, à nous montrer et à nous expliquer leurs infrastructures de transformation et à partager leur expertise avec nous : l'Union suisse de paysans (USP), l'Institut de recherche de l'agriculture biologique (FiLB), l'Académie des sciences naturelles (SCNAT), la Stiftung für Konsumentenschutz (SKS), la Fédération romande des consommateurs (FRC), le Konsumentenforum (Kf), l'Alliance environnement, la Schweizerische Arbeitsgemeinschaft für Gentechnologie (SAG), la Coordination romande sur le génie génétique (StopOGM), les sucrerie d'Aarberg et Frauenfeld (SAF), le Centre betteravier suisse (CBS), scienceindustries, Agromarketing Suisse, le Prof. Cesare Gessler, Swisspatat, la Station ornithologique suisse et Fruit-Union Suisse. Leur soutien fut infiniment précieux.

Nous sommes également très reconnaissants à notre groupe d'accompagnement scientifique de l'Institut des sciences en durabilité agronomique d'Agroscope pour leurs idées intéressantes et leurs discussions critiques. Leur longue expérience et leur grand savoir-faire nous ont été d'un soutien capital.

7 Annexe

7.1 Abréviations

Abréviations	Signification
OGM	organisme génétiquement modifié
Bt	toxine insecticide produite la bactérie *Bacillus thuringiensis*
RM	résistance au mildiou
RTFB	résistante à la tavelure et au feu bactérien
conv.	conventionnel
ADMC	analyse décisionnelle multicritères

7.2 Bibliographie

Abbas HK, Zablotowicz RM, Weaver MA, et al (2013) Implications of Bt Traits on mycotoxin contamination in maize: Overview and recent experimental results in southern United States. In: Journal of Agricultural and Food Chemistry. pp 11759–11770

Aerni, P. , Scholderer, J. , Ermen, D. (2011) : How would Swiss consumers decide if they had freedom of choice ? Evidence from a field study with organic, conventional and GM corn bread. In : Food Policy 36 : 830-838.

Agridea (2013a) : Deckungsbeiträge 2013. Kann bezogen werden unter : www.agridea.ch > Übersicht > Publikationen > Betrieb, Familie, Diversifizierung > Buchhaltung, Betriebsplanung, Zahlen > Betriebsplanung (Stand 13.06.2014).

Agridea (2013b) : Wirz Handbuch. Pflanzen und Tiere 2013 (wird jährlich neu aufgelegt).

Agridea (2014) : Datenblätter Ackerbau. Kapitel Bekämpfungsschwellen. Kann bezogen werden unter : www.agridea.ch > Publikationen > Pflanzenbau > Ackerbau > Datenblätter Ackerbau (Stand 13.06.2014).

Agroscope (2014a) : Erste Glyphosat-Resistenz in der Schweiz (PDF). Kann abgerufen werden unter : www.agroscope.ch > Aktuell > Medieninformationen > Mitteilungen für Fachmedien.

Agroscope (2014b) : Geplanter Feldversuch mit cisgenen Kartoffeln mit Resistenz gegen die Kraut- und Knollenfäule. Kann abgerufen werden unter : http:,,www.news.admin.ch,NSBSubscriber,message,attachments,37237.pdf (Stand 26.11.2014)

Agroscope (2014c) : Mykotoxine. Kann abgerufen werden unter : http:,,www.agroscope.admin.ch,ernaehrung,01082,01110,01114,index.html?lang=de (Stand : 06.06.2014).

Alarcon, Jr R.N. , Hoffman, G.D. , Wardell, G. , (2009) : Fungicides Can Reduce Pollination Potential. Western Farm Press. Vol 31(7) pp. 17 & 21.

Al-Assiuty, A. I.M. , Khalil, M. A. , Ismail, A. A. , van Straalen, N.M. , Ageba, M. F. (2014) : Effects of fungicides and biofungicides on population density and community structure of soil oribatid mites. Science of the Total Environment 466–467 (2014) 412–420.

Albisser Vögeli, G. , Burose, F. , Wolf, D. , Lips, M (2011) : Wirtschaftlichkeit gentechnisch-veränderter Ackerkulturen in der Schweiz : Mit detaillierter Berücksichtigung möglicher Koexistenz-Kosten. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänkon ART, Ettenhausen.

Andersen MM, Landes X, Xiang W, et al (2015) Feasibility of new breeding techniques for organic farming. Trends Plant Sci 20:426–34.

Apisuisse (2013) : Stellungnahme zur Koexistenzverordnung. Kann abgerufen werden unter : www.vdrb.ch > Aktuelles > Archiv (Stand 13.06.2014).

APVMA = Australian Pesticides & Veterinary Medicines Authority (2006) : Evaluation of the new active Prohexadione-Calcium in the Product Regalis Plant Growth Regulator. Kann abgerufen werden unter : http:,,www.apvma.gov.au,registration,assessment,docs,prs_prohexadione_calcium.pdf (Stand 21.05.2014).

Auger, P. , Kreiter, S. , Mattioda, H. , Duriatti, A. (2003) : Side effects of mancozèbe on Typhlodromus pyri (Acari : Phytoseiidae) in vineyards : results of multi-year field trials and a laboratory study. Experimental and Applied Acarology 33 : 203–213, 2004.

Babendreier, D. , Kuske, S. , Bigler, F. (2003a) : Non-target host acceptance and parasitism by *Trichogramma brassicae* Bezdenko (Hymenoptera : Trichogrammatidae) in the laboratory. Biological Control 26 (2003) 128–138.

Babendreier, D. , Schoch, D. , Kuske, S. , Dorn, S. , Bigler, F. (2003b) : Non-target host acceptance and parasitism by *Trichogramma brassicae* (Hymenoptera : Trichogrammatidae) : what are the risks for endemic butterflies ? Agricultural and Forest Entomology (2003) 5, 199–208.

Babendreier, D. , Rostas, M. , Jöfte, C.J. , Kuske, S. , Bigler, F. (2003c) : Effects of mass releases of Trichogramma brassicae on predatory insects in maize. Entomologia Experimentalis et Applicata 108 : 115–124.Biondi, Antonio , Mommaerts, Veerle , Smagghe, Guy , Vinuela, Elisa , Zappala, Lucia , Desneu, Nicolas (2012) : The non-target impact of Spinosyns of beneficial arthropods. Pest Management Science, 2012 ; 68 : 1523–1536.

BAFU , BLW (2008) : Umweltziele Landwirtschaft. Hergeleitet aus bestehenden rechtlichen Grundlagen. Umwelt-Wissen Nr. 0820. Bundesamt für Umwelt, Bern : 221 S. Kann abgerufen oder bezogen werden unter : www.bafu.admin.ch > Dokumentation > Publikationen > Biodiversität (Stand 19.05.2014).

BAFU , BLW (2013) : Erläuternder Bericht betreffend die Änderung des Gentechnikgesetzes (Berücksichtigung der Ergebnisse des NFP 59 und der GVO-freien Gebiete). Entwurf vom 30. Januar 2013.

Bantleon, G. (2012) : Feuerbrand : Charakterisierung und Bekämpfungsmaßnahmen, Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Agrarwissenschaften an der Universität Hohenheim.

Barbar, Z. , Tixier MS. , Kreiter S. (2007) : Assessment of pesticide susceptibility for Typhlodromus exhilaratus and Typhlodromus phialatus strains (Acari : Phytoseiidae) from vineyards in the south of France. Experimental and Applied Acarology June 2007, Volume 42, Issue 2, pp 95-105.

Baumgartner, D. , Gilliard, A. , Höhn, E. (2007) : Essqualität von Äpfeln und Infrarotspektroskopie, Schweiz. Z. Obst-Weinbau ; 20,07.

Baur P, Nitsch H (2013) Umwelt- und Tierschutz in der Landwirtschaft: Ein Vergleich der Schweiz mit ausgewählten europäischen Länderne unter besonderer Berücksichtigung des Vollzugs.

Beckert M, Dessaux Y, Tibi A. (2011). Variétés végétales tolérantes aux herbicides. Effegs agronomiques, environnementaux, socio-économiques. Rapport d'expertise coolective de l'INRA

Bernard, M. B. , Horne, P. A. , Hofmann, A. A. (2004) : Developing an Ecotoxicological Testing Standard for Predatory Mites in Australia : Acute and Sublethal Effects of Fungicides on Euseius victoriensis and Galendromus occidentalis (Acarina : Phytoseiidae), Journal of Economic Entomology 2004 Jun;97(3):891-9.

Bigler, F. , Albajes, R. (2011) : Indirect effects of genetically modified herbicide tolerant crops on biodiversity and ecosystem services : the biological control example. Journal für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (2011) 6 (Suppl 1):S79–S84.

Biotechnologie.de (2011) : BASF beantragt Zulassung für weitere Biotech-Kartoffel. Kann abgerufen werden unter : https:,,www.biotechnologie.de,BIO,Navigation,DE,root,did=137496.html (Stand 17.06.2014).

Bitzer, A. , Bregy, G. , Schuler, R. (2012) : Perspektiven für den Schweizer Apfel. Masterarbeit MBA 1004, Hochschule Luzern HSLU.

BLW (2012) : Agrarbericht 2012. Kann abgerufen werden unter : www.blw.admin.ch > Dokumentation > Publikationen > Archiv (Stand 13.06.2014).

BLW (2013) : Agrarbericht 2013. Kann abgerufen werden unter : www.blw.admin.ch > Dokumentation > Publikationen > Agrarbericht 2013 (Stand 13.06.2014).

BLW (2014) : Allgemeinverfügung über die Zulassung eines Pflanzenschutzmittels in besonderen Fällen. SUlfate de potassium-aluminium. Kann abgerufen werden unter : www.blw.admin.ch > Themen> Produktionsmittel > Pflanzenschutzmittel (Stand, 20.06.2014).

Bock, A.-K. , Lheureux, K. , Libeau-Dulos, M. , Nilsagard, H. , Rodriguez-Cerezo, E. (2002) : Scenarios for co-existence of genetically modified, conventional and organic crops in European agriculture. Report EUR 20394EN. Europäische Kommission : Joint Research Center.

Bohanec M, Messéan A, Scatasta S, et al (2008) A qualitative multi-attribute model for economic and ecological assessment of genetically modified crops. Ecol Modell 215:247–261.

Bonfadelli, H. (2010) : Grüne Gentechnik im öffentlichen Diskurs : Interessen, Konflikte und Argumente. Konstanz : UVK Verlagsgesellschaft mbH.

Bonneuil C, Joly PB (2013). Siences, techniques et sociétés. Ed. La Découverte

Broggini GA, Wöhner T, Fahrentrapp J, Kost TD, Flachowsky H, Peil A, Hanke MV, Richter K, Patocchi A, Gessler C. (2014) Engineering fire blight resistance into the apple cultivar 'Gala' using the FB_MR5 CC-NBS-LRR resistance gene of Malus × robusta 5. Plant Biotechnol J. 12(6):728-33.

Brookes G, Barfoot P (2013) Key environmental impacts of global genetically modified (GM) crop use 1996-2011. GM Crops Food 4:109–19. doi: 10.4161,gmcr.24459

Brookes, G., Barfoot, P. (2014) : Global income and production effects of GM crops 1996-2012, GM Crops and Food : Biotechnology in Agriculture and the Food Chain 2014,5.1, 1-11.

Bruck, D. (2009) : Impact of fungicides on Metarhizium anisopliae in the rhizosphere, bulk soil and in vitro, BioControl Journal of the International Organization for Biological Control, 10.1007,s10526-009-9213-1

Bundesinstitut für RisikoEvaluation (BfR) (2013) : Das BfR hat einen Entwurf zur NeuEvaluation des gesundheitlichen Risikos von Glyphosat erstellt. Kann abgerufen werden unter : http:,,www.bfr.bund.de,de,das_bfr_hat_einen_entwurf_zur_neuEvaluation_des_gesundheitlichen_risikos_von_glyphosat_erstellt-188579.html (Stand 07.06.2014).

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (2011) : Maiszünsler – Ein raffinierter Schädling. Kann abgerufen werden unter : http:,,www.biosicherheit.de,basisinfo,126.raffinierter-schaedling.html (Stand 06.06.2014).

Bünemann. E.K , Schwenke, G.D , Van Zwieten, L (2006) : Impact of agricultural inputs on soil organisms—a review, Australian Journal of Soil Research, 2006, 44, 379–406.

Brunner S, Stirnweis D, Diaz Quijano C, et al (2012) Transgenic Pm3 multilines of wheat show increased powdery mildew resistance in the field. Plant Biotechnol J 10:398–409.

Cakmak, I , Yaziki, A , Tutus, Y , Ozturk, L (2009) : Glyphosate reduced seed and leaf concentrations of calcium, manganese, magnesium, and iron in non-glyphosate resistant soybean. European Journal of Agronomy 31:114–119. doi:10.1016,j.eja.2009.07.001

Chamberlain, D.E. , Freeman, S.N. , Vickery, J.A. (2007) : The effects of GMHT crops on bird abundance in arable fields in the UK. Agriculture, Ecosystems and Environment 118 (2007) 350–356.

Champion, G. (2011) : Lessons learned from the farm scale evaluation of GMHT crops. Journal für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit. May 2011, Volume 6, Issue 1 Supplement, pp 73-78.

Charta zur Qualitätsstrategie in der Schweizerischen Land- und Ernährungswirtschaft. Kann abgerufen werden unter : http:,,www.qualitaetsstrategie.ch,de (Stand 06.06.2014).

Cheeke, T. E. , Cruzan, M. B. , Rosenstiel, T.N. (2013) Field Evaluation of Arbuscular Mycorrhizal Fungal Colonization in Bacillus thuringiensis Toxin-Expressing (Bt) and Non-Bt Maize, Applied and Environmental Microbiology, 2013, 79(13):4078.

CERA = Center for Environmental Risk Assessment (2010) : A Review of the Environmental Safety of the CP4 EPSPS Protein, kann abgerufen werden unter : http:,,cera-gmc.org,docs,cera_publications,pub_01_2010.pdf (Stand 22.05.2014).

Cernohlavkova, J. , Jarkovsky, J. , Hofman, J. (2009) : Effects of fungicides mancozèbe and dinocap on carbon and nitrogen mineralization in soils, Ecotoxicology and Environmental Safety 72(2009)80–85.

CESAR = Centre for Environmental Stress and Adaptation Research. Kann abgerufen werden unter : www.cesar.org.au > Beneficials > Search by Active ingredient > Captan (Stand 22.05.2014)

CESAR = Centre for Environmental Stress and Adaptation Research. Kann abgerufen werden unter : www.cesar.org.au > Beneficials > Search by Active ingredient > Mancozèbe (Stand 22.05.2014)

Comas, C. , Lumbierres, B. , Pons, X. , Albajes, R. (2013) : No effects of Bacillus thuringiensis maize on nontarget organisms in the field in southern Europe : a meta-analysis of 26 arthropod taxa. Transgenic Research, 2014 , 23, Issue 1, pp 135-143.

Cuthbertson, A.G.S. , Murchie, A.K. (2003) : The impact of fungicides to control apple scab (Venturia inaequalis) on the predatory mite Anystis baccarum and its prey Aculus chlechtendali (apple rust mite) in Northern Ireland Bramley orchards. Crop Protection 22 (2003) 1125–1130

Cycon, M. , Piotrowska-Seget, Z. , Koxdroj, J. (2010) : Responses of indigenous microorganisms to a fungicidal mixture of mancozèbe and Diméthomorphe added to sandy soils. International Biodeterioration & Biodegradation 64 (2010) 316-323.

Dahinden, M. , Romeis, J. , Selter, L. , Folkers, G. (2014) : Gentechnikfreie Schweiz – (k)ein Szenario für die Zukunft. Kann abgerufen werden unter : www.plantsciences.uzh.ch > Outreach > Conferences & Symposia > Fachtagungen.

Daouk S, De Alencastro LF, Pfeifer HR. (2013) The herbicide glyphosate and its metabolite AMPA in the Lavaux vineyard area, western Switzerland: proof of widespread export to surface waters. Part II: the role of infiltration and surface runoff. J Environ Sci Health B. 48(9):725-36.

Délye, C. , Jasieniuk, M. , Le Corre, V. (2013) : Deciphering the evolution of herbicide resistance in weeds. Trends in Genetics (2013) Volume 29, Issue 11, November 2013, Pages 649–658

Demont, M. , Devos, Y. (2008) : Regulating coexistence between GM and non-GM crops without jeopardizing economic incentives. In : Trends in Biotechnology, 26(7) ; 353-358.

Devos Y, Demont M, Dillen K, et al (2009) Coexistence of genetically modified (GM) and non-GM crops in the European Union. A review. Agron Sustain Dev 29:11–30.

Dietiker, D. , Stamp, P. , Eugster, W. (2011) : Predicting seed admixture in maize combining flowering characteristics and a Lagrangian stochastic dispersion model ; Field Crops Research, 2011, doi : 10.1016,j.fcr.2010.12.009

Dinter, A. , Wiles, J. A. (2000) : Safety of the new DuPont insecticide « Indoxacarb » to beneficial arthropods : an overview. Integrated Control in Viticulture IOBC,wprs Bulletin Vol. 22 (9) 2000 pp. 149 – 156.

Duan, J.J. , Marvier, M. , Huesing, J. , Dively, G. , Huang, Z. Y. (2008) : A Meta-Analysis of Effects of Bt Crops on Honey Bees (Hymenoptera : Apidae), PLoS ONE, 3(1) : e1415. doi:10.1371,journal.pone.0001415

Duke, S. O. , Powles, S. B. (2008) : Mini-review Glyphosate : a once-in-a-century herbicide. Pest Management Science, 64 (2008), 319–325.

Edgerton MD, Fridgen J, Anderson JR, et al (2012) Transgenic insect resistance traits increase corn yield and yield stability. Nat Biotechnol 30:493–496.

Eggenschwiler, C. , Lehmann, B. , Rudmann, C. , Wolf, H.P. (1999) : Betriebswirtschaftliche Analyse des Einsatzes biologisch-technischen Fortschrittes unter Einbezug gentechnischer Varianten : Technischer Bericht. ETH Zürich : Institut für Agrarwirtschaft.

Eidgenössisches Departement des Inneren (2005) : Verordnung des EDI über gentechnisch veränderte Lebensmittel (VGVL). Stand : 23. November 2005.

Eidgenössisches Institut für geistiges Eigentum (s.a.) : Swissness. Schutz der Bezeichnung « Schweiz » und des Schweizerkreuzes. Kann abgerufen werden unter : https:,,www.ige.ch,de,juristische-infos,rechtsgebiete,swissness.html (Stand 06.06.2014).

Eigenmann, C. , Höhn, E. , Kellerhals, M. ; Apfel : was wollen die Konsumenten ? Schweiz. Z. Obst-Weinbau, 19,05.

EPA (2010) : Biopesticides registration action document Cry1Ab and Cry1F Bacillus thuringiensis (Bt) Corn Plant-Incorporated Protectants. Kann abgerufen werden unter : http:,,www.epa.gov,opp00001,biopesticides,pips,cry1f-cry1ab-brad.pdf (Stand 13.06.2014)

Eurobarometer (2010a) : Biotechnologie Bericht. Europäische Kommission : Eurobarometer Spezial 328.

Eurobarometer (2010b) : Europeans and biotechnology in 2010 – Winds of change ? Europäische Kommission : Technical Report.

Fahrentrapp J, Broggini GA, Kellerhals M, et al (2013) A candidate gene for fire blight resistance in Malus × robusta 5 is coding for a CC–NBS–LRR. Tree Genet Genomes 9:237–251.

Felber, F. , Kozlowski, G. , Arrigo, N. , Guadagnuolo, R. (2007) : Genetic and Ecological Consequences of Transgene Flow to the Wild Flora, Advances in Biochemical Engineering , Biotechnology (2007) 107 : 173–205.

Felke, M. , Langebruch, G. (2005) : Auswirkungen des Pollens von transgenem Maïs Btauf ausgewählte Schmetterlingslarven. BfN Skripten 157 , 2005. Kann abgerufen werden unter www.bfn.de > Service > Veröffentlichungen > BfN Skripten > Gentechnik (Stand 16.05.2014).

Fernandez-Cornejo, F. , Wechsler, S. , Livingston, M. , Mitchell, L. (2014) Genetically Engineered Crops in the United States. United States Department of Agriculture. Economic Research Report Number 162.

Gassmann AJ, Petzold-Maxwell JL, Keweshan RS, Dunbar MW (2011) Field-evolved resistance to Bt maize by Western corn rootworm. PLoS One.

Geiger, F. , Bengtsson, J. , Berendse, F. , Weisser, W. W. , Emmerson, M. , Morales, M. B. , Ceryngier, P., Liira, J. , Tscharntke, T. , Winqvist, C. , Eggers, S. , Bommarco, R. , Pärt, T. , Bretagnolle, V. , Plantegenest, M. , Clement, L.W. , Dennis, C. , Palmer, C. , Onate, J. J. , Guerrero, I., Hawro, V. , Aavik, T., Thies, C. , Flohre, A. , Hänke, S. , Fischer, C. , Goedhart, P.W. , Inchausti, P. (2010) : Persistent negative effects of pesticides on biodiversity and biological control potential on European farmland. Basic and Applied Ecology 11(2010)97–105.

Gessler, C. , Patocchi, A. , Sansavini, S. , Tartarini, S. , Gianfranceschi, L. (2006) : Venturia inaequalis Resistance in Apple, Critical Reviews in Plant Sciences, 25:6, 473-503

Gibbons, D. W. , Bohan, D. A., Rothery, P. , Stuart, R. C. , Haughton, A. J. , Scott, R. J. , Wilson, J.D. , Perry, J. N. , Clark, S.J. , Dawson, R. J.G. , Firbank, L. G. (2006) : Weed seed resources for birds in fields with contrasting conventional and genetically modified herbicide-tolerant crops. Proceedings of the Royal Society Biological Sciences, (2006) 273 1921-1928.

Giesy, JP. , Dobson, S. , Solomon, K. (2000) : Ecotoxicological risk assessment for Roundup® herbicide. In : Reviews of Environmental Contamination and Toxicology 2000,8:269-278.

Gómez-Barbero, M. , Rodríguez-Cerezo, E. (2006) : Economic impact of GM crops worldwide : A review. Report EUR 22547 EN. Europäische Kommission : Joint Research center.

Gómez-Barbero, M. , Berbel, J. , Rodríguez-Cerezo, E. (2008) : Adoption and performance of the first GM crop introduced in EU agriculture : Bt maize in Spain. Report EUR 22778 EN. Europäische Kommission : Joint Research Center.

Green, M.R. (1987) : Energy in pesticide manufacture, distribution and use. Energy in Plant Nutrition and Pest Control, Energy in World Agriculture Vol. 2 : 165-177

Green, J.M. (2014) Current state of herbicides in herbicide-resistant crops. Pest Manag. Sci. 70:1351–1357.

Griffiths, B.S. , Ritz, K. , Wheatley, R. , Kuan, H.L. , Boag, B. , Christensen, S. , Ekelund F. , Sorensen, S.J. , Muller, S. , Bloeam, J. (2001) : An examination of the biodiversity-ecosystem function relationship in arable soil microbial communities. Soil Biology & Biochemistry 33 (2001) 1713-1722

Habermas J. (1968). Technik und Wissenschaft als Ideologie. Suhrkramp Verlag. Frankfurt am Main

Hänsch, R , Mendel, RR (2009) : Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn,Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl). Current Opinion Plant Biology 12 : 259–266.

Harris, M.L , van den Heuvel, M.R. , Rouse, J. , Martin, P.A. , Struger, J. , Bishop, C.A. , Takacs, P. (2000) : Pesticides in Ontario : A Critical Assessment of Potential Toxicity of Agricultural Products to Wildlife, with Consideration for Endocrine Disruption. Volume 1 : Endosulfan, EBDC fungicides, Dinitroanaline herbicides, 1,3-Dichloropropene, Azinphos-methyl, and pesticide mixtures. Technical Report Series No. 340. Canadian Wildlife Service, Ontario Region.

Hartzler, B (2010) : Glyphosate-Manganese Interactions in Roundup Ready Soybean. Iowa State University,University Extension. 2 pp. Kann abegrufen werden unter : www.weeds.iastate.edu,mgmt,2010,glymn.pdf.

Haughton, A.J. , Champion, G. T , Hawes, C. , Heard, M.S. , Brooks, D.R. , Bohan, D.A. , Clark, S. J. , Dewar, A.M. , Firbank, L.G. , Osborne, J.L. , Perry, J.N. , Rothery, P. , Roy, D.B. , Scott, R.J. , Woiwod, I.P. , Birchall, C. , Skellern, M.P. , Walker, J.H. , Baker, P. , Browne, E.L. , Dewar, A.J.G. , Garner, B.H. , Haylock, L.A. , Horne, S.L. , Mason, N.S. , Sands, R.J.N. , Walker, M.J. (2003) : Invertebrate responses to the management of genetically modified herbicide–tolerant and conventional spring crops. II. Within-field epigeal and aerial arthropods. Proceedings of the Royal Society Biological Sciences, (2003) 358 1863-1877.

Hawes, C. , Haughton, A.J. , Osborne, J.L. , Roy, D.B. , Clark, S.J. , Perry, J.N. , Rothery, P. , Bohanm D,A. , Brooks, D.R. , Champion, G.T. , Dewar, A.M. , Heard, M.S. , Woiwod, I.P. , Daniels, R.E. , Young, M.W. , Parish, A.M. , Scott, R.J. , Firbank, L.G. , Squire, G.R. (2003) : Responses of plants and invertebrate trophic groups to contrasting herbicide regimes in the Farm Scale Evaluations of genetically modified herbicide-tolerant crops. Proceedings of the Royal Society Biological Sciences (2003) 358, 1899–1913

Heap, I. (2014) : The International Survey of Herbicide Resistant Weeds. Kann abgerufen werden unter : www.weedscience.org (Stand März 2014).

Hebeisen, T. , Ballmer. T. , Musa, T. , Torche, J.-M. , Schwaerzel, R. (2013) : Schweizerische Sortenliste für Kartoffeln 2014. Agrarforschung Schweiz. 4, (11-12), 2013, 1-8

Hilbeck A, Meier M, Römbke J, et al (2011) Environmental risk assessment of genetically modified plants - concepts and controversies. Environ Sci Eur 23:13.

Hilbeck A, Lebrecht T, Vogel R, Heinemann JA, Binimelis R. (2013) Farmer's choice of seeds in four EU countries under different levels of GM crop adoption. Environ Sci Eur. 25:12, 1-13

Hilbeck A, Binimelis R, Defarge N, et al (2015) No scientific consensus on GMO safety. Environ Sci Eur 27:4.

Hilton, H.W. (1957) : Herbicide tolerant strains of weeds. Hawaiian Sugar Plant. Assoc. Annu. Rep. p 69.

Hirzinger, T. , Menrad, K. (2005) : Effects of the regulation (EC) N° 1829,2003 and 1830,2003 on the german food industry. In : Messèan, A. (Hrsg.) : Proceedings, Second International Conference on Co-Existence between GM and non-GM based agricultural supply chains, S. 125-130,

Holland, J.M. (2004) : The environmental consequences of adopting conseravtion tillage in Europe : reviewing the evidence. Agriculture, Ecosystems and Environment 103 (2004), 1–25.

Holtschulte, Bernd , Korbel, Gary , Miller, Jay (2011) : Nutrient deficiencies in glyphosate-resistant sugar beets ? American Society of Sugar Beet Technologists, Proceedings from the 36th Biennial Meeting. Kann abgerufen werden unter : http:,,assbt-proceedings.org > 2011 > Agronomy.

Howard, J.H. , Julian, S. E. , Ferrigan, J. (2002) : Golf course design and maintenance : impacts on amphibians. USGA Turfgrass and Environmental Research Online 1:1-21.

Howell, C.C. (2011) : How do pesticides impact soil microbial structure and functioning ? PhD thesis, University of Warwick.

HRAC = Herbicide Resistance Action Committee (2014). Kann abgerufen werden unter http:,,www.hracglobal.com, (Stand März 2014).

Huber, DM (2007) : What about glyphosate-induced manganese deficiency ? Fluid Journal Fall 2007 : 20-22

Hutchison WD, Burkness EC, Mitchell PD, et al (2010) Areawide Suppression of European Corn Borer with Bt Maize Reaps Savings to Non-Bt Maize Growers. Science (80-) 330:222–225.

Icoz, I. , Stotzky, G. (2007) Fate and effects of insect-resistant Bt crops in soil ecosystems. Soil Biology & Biochemistry 40 (2008) 559–586.

Imfeld, G., Vuilleumier, S. (2012) : Measuring the effects of pesticides on bacterial communities in soil : a critical review, European Journal of Soil Biology 49 (2012) 22e30.

Ipsilantis, I., Samourelis, C. , Karpouzas, D. (2012) : The impact of biological pesticides on arbuscular mycorrhizal fungi. Soil Biology & Biochemistry, 45 (2012) 147e155.

Jacobsen S-E, Sørensen M, Pedersen SM, Weiner J (2015) Using our agrobiodiversity: plant-based solutions to feed the world. Agron Sustain Dev.

Jacobsen S-E, Sørensen M, Pedersen SM, Weiner J (2013) Feeding the world: genetically modified crops versus agricultural biodiversity. Agron Sustain Dev 33:651–662.

Jänsch, M. , Paris, R. , Amoako-Andoh, F. , Keulemans, W. , Davey, M.W. , Pagliarani, G. , Tartarini, S. , Patocchi, A. (2013) : A Phenotypic, Molecular and Biochemical Characterization of the First Cisgenic Scab-Resistant Apple Variety 'Gala'. Plant Mol Biol Rep DOI 10.1007,s11105-013-0682-0

Jahn, T. , Hötker, H. , Oppermann, R. , Bleil, R. , Vele, L.(2013) : Protection of biodiversity of free living birds and mammals in respect of the effects of pesticides. Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, Germany. Texte | 30,2014.

Jensen, M., Linke, K. , Dickhäuser, A. , Feige, B. (1999) : The effect of agronomic photosystem-II herbicides on lichens, Lichenologist 31(1) : 95–103.

Jin L, Zhang H, Lu Y, et al (2015) Large-scale test of the natural refuge strategy for delaying insect resistance to transgenic Bt crops. Nat Biotechnol 33:169–74.

Jo K-R, Kim C-J, Kim S-J, et al (2014) Development of late blight resistant potatoes by cisgene stacking. BMC Biotechnol 14:50.

Kahane R, Hodgkin T, Jaenicke H, et al (2013) Agrobiodiversity for food security, health and income. Agron Sustain Dev 33:671–693.

Kahn, S. , Bagwan, N.B. , Fatima, S. , Iqbal M.A. (2012) In vitro Compatibility of Two Entomopathogenic Fungi with Selected Insecticides, Fungicides and Plant Growth Regulators, Libyan Agriculture Research Center Journal International 3 (1) : 36-41, 2012.

Kegley, S.E. , Hill, B.R. , Orme S. , Choi A.H. (2010a) : PAN Pesticide Database, Pesticide Action Network, North America (San Francisco, CA, 2010), Kann abgerufen werden unter : http:,,www.pesticideinfo.org,List_AquireAcute-Sum.jsp?Rec_Id=PC37275&Taxa_Group=Molluscs (Stand 21.05.2014).

Kegley, S.E. , Hill, B.R. , Orme S. , Choi A.H. (2010b) : PAN Pesticide Database, Pesticide Action Network, North America (San Francisco, CA, 2010), Kann abgerufen werden unter : http:,,www.pesticideinfo.org,List_AquireAcute-Sum.jsp?Rec_Id=PC34569&Taxa_Group=Molluscs (Stand 21.05.2014).

Kim KH, Kabir E, Kabir S. A review on the human health impact of airborne particulate matter. Environ Int. 2015 Jan;74:136-43.

Kniss A.R. (2010) : Comparison of conventional and glyphosate-resistant sugarbeet in the year of commercial introduction in Wyoming. Journal of Sugar Beet Research 2010;47:127–34.

Kohler, R. (2005) : Kosten der Koexistenz landwirtschaftlicher Anbausysteme mit und ohne Gentechnik – eine Literaturanalyse. Tänikon : Agroscope, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik.

Kowach, J. , Petzoldt, C. , Degni, J. (1992) : A Method to Measure the Environmental Impact of Pesticides. In : New York Food and Life Sciences Bulletin Number 139.

Krens FA, Schaart JG, van der Burgh AM, et al (2015) Cisgenic apple trees; development, characterization, and performance. Front Plant Sci.

KWS (2013) : Cátalogo 2013. Aktueller Katalog aus 2014 kann abgerufen werden unter : http:,,www.hectagro.pt,img,layout,destaque,catalogo-KWS-2014_3MB.pdf (Stand 13.06.2014).

Lagnaoui, A. , Radcliffe, E. B. (1998) : Potato Fungicides Interfere With Entomopathogenic Fungi Impacting Population Dynamics of Green Peach Aphid, American Journal of Potato Research (1998) 75.-19-25.

Lang, A. , Arndt, M. , Beck, R. , Bauchhenss, J. (2005) : Monitoring der Umweltwirkungen des Bt-Gens. Forschungsprojekt im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (StMUGV). Kann abgerufen werden unter www.lfl.bayern.de > Publikationen > LfL-Schritenreihe (Stand, 16.05.2014).

Ledford H. CRISPR, The disruptor. (2015). Nature, 522:20-24

Liao, X., Liu, J. , Luo, S. , Wu, J. (2013) : Evaluation the Toxicity of Five Pesticides to Two Species of Bumblebees, Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica 2013-04.

Lichtfouse E, Navarrete M, Debaeke P, et al (2009) Agronomy for sustainable agriculture. A review. Agron Sustain Dev 29:1–6.

Li, D.X. , Tian, J. , Shen, Z.R. (2006) : Effects of pesticides on the functional response of predatory thrips, Scolothrips takahashii to Tetranychus viennensis. Journal of Applied Entomology 130(5), 314–322 (2006).

LID = Landwirtschaftlicher Informationsdienst (2014) : Allgemeines zur Kartoffel. Kann abgerufen werden unter www.landwirtschaft.ch > Wissen > Pflanzen > Kartoffelbau (Stand 17.06.2014).

Liebegg, Landwirtschaftliches Zentrum (2012) : Steckbrief Zuckerrüben. Kann abgerufen werden unter www.liebegg.ch > Fachwissen > Feldbau > Publikationen Liebegg > Steckbriefe von Ackerkulturen > Zuckerrüben (Stand 9.05.2014).

Lu Y, Wu K, Jiang Y, et al (2012) Widespread adoption of Bt cotton and insecticide decrease promotes biocontrol services. Nature 487:362–365.

Malone, L.A. , Burgess, E.P.J (2009) : Impact of genetically modified crops on pollinators. In : Environmental Impact of Genetically Modified Crops, Ferry N & Gatehouse AMR (eds.). CAB International, UK. pp. 199-222.

Mamy, L. , Gabrielle, B., Barriuso, E. (2010) : Comparative environmental impacts of glyphosate and conventional herbicides when used with glyphosate-tolerant and non-tolerant crops. Environmental Pollution 158 (2010) 3172e3178.

Mann, S. (2013) : Gentechnik und Wettbewerbsfähigkeit unter Schweizer Bedingungen. Podcast kann abgerufen werden unter : www.multimedia.ethz.ch > Conferences > 2013 > Grüne Gentechnologie (Stand 17.06.2014).

Menrad K, Gabriel A, Gylling M (2009) Costs of co-existence and traceability systems in the food industry in Germany and Denmark. Paper prepared for presentation on GMCC 2009, Melbourne,

Messean A, Angevin F, Gomez-Barbero M, et al (2006) New case studies on the coexistence og GM and non-GM crops in European agriculture. 1–112.

McConnell, L.L , Sparling, D.W. (2010) : Emerging contaminants and their potential effects on amphibians and reptiles. Ecotoxicology of Amphibians and Reptiles, Second Edition, CRC Press 2010Pages 487–509.

McCune, B., Grenon, J. , Martin, E. (2007) : Lichens in Relation to Management Issues in the Sierra Nevada National Parks, North American Fungi (2007) : 1-39.

Meissle, M. , Mouron, P. , Musa, T. , Bigler, F. , Pons, X. , Vasileiadis, V.P. , Otto, S. , Antichi, D. , Kiss, J. , Palinka, Z. , Dorner, Z. , van der Weide, R. , Groten, J. , Czembor, E., Adamczyk, J. , Thibord, J.-B. , Melander, B. , Cordsen Nielsen G. , Poulsen, R.T. , Zimmermann, O. , Verschwele, A. , Oldenburg, E. (2011) : Pests, pesticide use and alternative options in European maize production : current status and future prospects. Journal of Applied Entomolgy 134 : 357-375.

Menrad, K. , Gabriel, A. , Gylling, M. (2009) : Costs of co-existence and traceability systems in the food industry in Germany and Denmark. Paper prepared for presentation on GMCC 2009, Melbourne.

Mesnage R, Bernay B, Séralini GE. Ethoxylated adjuvants of glyphosate-based herbicides are active principles of human cell toxicity. Toxicology. 2013 Nov 16;313(2-3):122-8.

Mildner, U. , Kühne, A. , Pölitz, B. , Westphal, K. , Steinhöfel, O. , Schareff, A. , Lichtenberg-Kraag, B. , Gruber, H. (2011) : Vertiefende Untersuchungen zu Konsequenzen des GVO-Anbaus in Sachsen. Schriftenreihe Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Freistaat Sachsen : Heft 11, 2011.

Moder, G. , Heissenberger, A. , Pöchtrager, S. (2004) : Umsetzung der Codex-Richtlinie zur Defintion der Gentechnikfreiheit im Futtermittelbereich – basierend auf festgelegten Grenzwerten im Biobereich. Wien : Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, Bundesministerium für Gesundheit und Frauen, Lebensministerium. Forschungsprojekt Nr. 1273.

Moncada, A.(2003) : Environmental fate of Indoxacarb. Department of Pesticide Regulations. Sacramento CA. Kann abgerufen werden unter : http:,,www.cdpr.ca.gov,docs,emon,pubs,fatememo,indoxacarb.pdf (Stand 16.05.2014).

Mouron, P. , Carint, D. (2001) : Rendite-Risiko-Profil von Tafelobstanlagen, Teil I und II. Schweizerische Zeitschrift für Obst- und Weinbau 137(5) : 78-81 und 106-110.

Musche, M. , Settele, J. , Durka, W. (2009) : Basisstudie zur Wechselwirkung von gentechnisch verändertem Mon810-Mais mit spezifische Schmetterlingsarten. Gutachten im Auftrag des Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landwirtschaft. Kann abgerufen werden unter www.sachsen.de > Umwelt, Landwirtschaft, Wald > Umwelt > Bio- und Gentechnologie, Chemikalien > Bio- und Gentechnologie > Veröffentlichungen (Stand 16.05.2014)

Naranjo, S. E. (2009) : Impacts of Bt Crops on non-target invertebrates and insecticide use patterns. CAB Reviews : Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources 2009 4, No. 011.

Nationales Forschungsprogramm 59, Leitungsgruppe (Hrsg.) (2012) : Nutzen und Risiken der Freisetzung gentechnisch veränderter Pflanzen. Programmsynthese.

NECR090 = Natural England Commissioned Report (2012) : Economic, biodiversity, resource protection and social values of orchards : A study of six orchards by the Herefordshire Orchards Community Evaluation Project. Kann abgerufen werden unter : www.naturalengland.org.uk > About us > News , Press release > 2012 (Stand 03.06.2014).

Nemecek, T., Kägi, T. (2007) : Life Cycle Inventories of Swiss and European Agricultural Production Systems, Final report ecoinvent V2.0 No. 15a. Agroscope Reckenholz-Taenikon Research Station ART, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Zurich and Dübendorf, CH, retrieved from : www. ecoinvent.ch

Nationales Forschungsprogramm (NFP) 59 (2012) : Nutzen und Risiken der Freisetzung gentechnisch veränderter Pflanzen, Programmsynthese des Nationalen Forschungsprogramms 59.

Newmaster, S. G. , Bell, W. F. , Vitt, D. H. (1999) : The effects of glyphosate and triclopyr on common bryophytes and lichens in northwestern Ontario, Can. J. For. Res. 29 : 1101–1111.

Nichterlein, H. , Matzk, A. , Kordas, L. , Kruas, J. , Stibbe, C. (2013) : Yield of glyphosate-resistant sugar beets and efficiency of weed management systems with glyphosate and conventional herbicides under German and Polish crop production. Transgenic Research (2013) 22:725–736.

NRC = National Research Council (2010) : Impact of Genetically Engineered Crops on Farm Sustainability in the United States. Committee on the Impact of Biotechnology on Farm-Level Economics and Sustainability. Washington, D.C. : The National Academies Press.

NYSIPM 2014 = New York State Integrated Pest Management. Datenbank kann abgerufen oder bezogen werden unter : www.nysipm.cornell.edu > IPM Tools > Environmental Impact Quotient (EIQ) > Table 2 List of Pesticides (Stand : 9.05.2014)

Oehen, B. , Hermanowski, R. , Mäder, R. , Morgner, M. , Stolze, M. (2006) : Kosten der Vermeidung von Gentechnik für Lebensmittelherstellung und –handel. Teilbericht 1.

OKER-CHEMIE GmbH (2013) : Sicherheitsdatenblatt Kaliumalaun. Kann abgerufen werden unter : http:,,www.oker-chemie.de,pdfs,747894_2_K_Alaun_de.PDF (Stand 22.05.2014).

Palmgren MG, Edenbrandt AK, Vedel SE, et al (2015) Are we ready for back-to-nature crop breeding? Trends Plant Sci 20:155–64.

Perry, J.N. , Devos, Y. , Arpaia, S. , Bartsch, D. , Gathmann, A. , Hails, R.S. , Kiss, J. , Lheureux, K. , Manachini, B. , Mestdagh, S. , Neemann, G. , Ortego, F. , Schiemann, J. , Sweet, J.B. (2010) A mathematical model of exposure of non-target Lepidoptera to BT-Maize pollen expressing Cry1Ab within Europe. Proceedings of the Royal Society Biological Sciences, (2010) 277, 1417–1425.Pflanzenschutzmittelverordnung, PSMV, 2010 : Verordnung über das Inverkehrbringen von Pflanzenschutzmitteln. 919.161.

Pettis JS , Lichtenberg EM , Andree M , Stitzinger J , Rose R , (2013) Crop Pollination Exposes Honey Bees to Pesticides Which Alters Their Susceptibility to the Gut Pathogen Nosema ceranae. PLoS ONE 8(7) : e70182. doi:10.1371,journal.pone.0070182

Piotrowska-Seget, R. , Engel, R. , Nowak, E. , Kozdroj, Jacek (2008) : Successive soil treatment with captan or oxytetracycline affects non-target microorganisms

Price, G.K. , Lin, W. , Falck-Zepeda, J.B. , Fernandez-Cornejo, J. (2003) : Size and Disribution of Market benefits From Adopting Biotech Crops. United States Department of Agriculture : Technical Bulletin Number 1906.

Pflanzenschutzmittelverordnung, PSMV, 2010 : Verordnung über das Inverkehrbringen von Pflanzenschutzmitteln. 919.161. Kann abgerufen werden unter : www.admin.ch > Bundesrecht > Systematische Rechtssammlung > Landesrecht > 9 Wirtschaft – Technische Zusammenarbeit > 91 Landwirtschaft > 916.161 Verordnung vom 12. Mai 2010 über das Inverkehrbringen von Pflanzenschutzmitteln (Pflanzenschutzmittelverordnung, PSMV) (Stand 13.06.2014).

Poletta, G.L. , Larriera, A. , Kleinsorge, E. , Mudry, M.D (2009) : Genotoxicity of the herbicide formulation Roundup® (glyphosate) in broad-snouted caiman (Caiman latirostris) evidenced by the Comet assay and the Micronucleus test. Mutation Research,Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis, Volume 672, Issue 2, 31 January 2009, Pages 95–102.

Qaim, M. (2009) : The economics of genetically modified crops. Annual Review of Resource Economics, Vol. 1 : 665-694.

Raymond Park J, McFarlane I, Hartley Phipps R, Ceddia G (2011) The role of transgenic crops in sustainable development. Plant Biotechnol. J. 9:2–21.

Raudonis, L. (2001) : Harmful insect fauna in apple orchards and systems of control means to reduce its harm. Horticulture and vegetable growing 20(1):55– 68.

Relyea, R. A. , Jones, D. K. (2009) : The toxicity of Roundup Original Max to 13 species of larval amphibians. Environmental Toxicology and Chemistry, (2009) 2004–2008.

Riah, W. , Laval, K. , Laroche-Ajzenberg, E. , Mougin, C. , Latour, X. , Trinsoutrot-Gattin, I. (2014) : Effects of pesticides on soil enzymes : a review. Environmental Chemistry Letters June 2014, Volume 12, Issue 2, pp 257-273.

Riscu, A. , Bura, M. (2013) : The Impact of Pesticides on Honey Bees and Hence on Humans. Animal Science and Biotechnologies, 2013, 46 (2).

Rose, R. , Dively, G. P. , Pettis, J. (2007) : Effects of Bt corn pollen on honey bees : Emphasis on protocol development, Apidologie 38 (2007) 368–377.

Roy, D.B. , Bohan, D.A. , Haughton, A.J. , Hill, M.O. , Osborne, J.L. , Clark, S.J. , Perry, J.N , Rothery, P. , Scott, R.J. , Brooks, D.R. , Champion, G.T. , Hawes, C. , Heard, M.S. , Firbank, L.G. (2003) : Invertebrates and vegetation of field margins adjacent to crops subject to contrasting herbicide regimes in the Farm Scale Evaluations of genetically modified herbicide-tolerant crops. Proceedings of the Royal Society Biological Sciences (2003) 358, 1879–1898.

Ruoss, E. (1999) : How agriculture affects lichen vegetation in central Switzerland. Lichenologist 31(1) : 63–73.

Sadok, W. , Angevin, F. , Bergez, J.-E. , Bockstaller, C. , Colomb, B. , Guichard, L. , Reau, R. , Doré, T. (2008) : Ex ante assessment of the sustainability of alternative cropping systems : implication for using multi-criteria decision-aid methods. A review. Agron. Sustain. Dev. 28 : 163-174.

Sánchez-Bayo, F. (2011) : Insecticides Mode of Action in Relation to Their Toxicity to Non-Target Organisms. Journal Environmental & Analytical Toxicology S4:002. doi:10.4172,2161-0525.S4-002

Sapieha-Waszkiewicz, A. , Marjańska-Cichoń, B. , Miętkiewski, R. (2004) : The effect of fungicides applied in apple orchards on entomopathogenic funghi in vitro, Electronic Journal of Polish Agricultural Universities, Horticulture, Volume 7, Issue 1

Schiefer, C. , Schubert, R. , Pölitz, B. , Kühne, A. , Westphal, K. , Steinhöfel, O. , Schaerff, A. (2008) : Untersuchungen zu Konsequenzen des Anbaus von GVO in Sachsen. Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft : Heft 15,2008.

Schmitz, G. , Bartsch, D. , Pretscher, P. (2003) : Selection of relevant non-target herbivores for monitoring the environmental effects of Bt maize pollen. Environmental Biosafety Research 2 (2003) 117–132

Schweiger, J. , Szerencsits, E. (2009) : Nachbarschaftliche Aspekte der Koexistenz mit transgenen Kulturen am Beispiel einer Schweizer Ackerbauregion. Jahrbuch der österreichischen Gesellschaft für Agrarökonomie.

SCNAT = Akademien der Naturwissenschaften Schweiz (2013) : Gentechnisch veränderte Nutzpflanzen und ihre Bedeutung für eine nachhaltige Landwirtschaft in der Schweiz.

SFZ = Schweizerische Fachstelle für Zuckerrübenbau (2013a) : Der Rübenpflanzer II , 2013. Kann abgerufen werden unter www.zuckerruebe.ch > Zuckerrüben > Unkraut > Unkrautkontrolle (Stand 13.06.2014).

SFZ = Schweizerische Fachstelle für Zuckerrübenbau (2013b) : Sortenliste 2013. Kann abgerufen werden unter www.zuckerruebe.ch > Zuckerrüben > Sorten > Sortenliste 2013 (Stand 13.06.2014).

SFZ = Schweizerische Fachstelle für Zuckerrübenbau (2003). Der Rübenpflanzer II , 2003. Kann abgerufen werden unter www.zuckerruebe.ch > Zuckerrüben > Weitere > Travail du sol (Stand 13.06.2014).

Shah, F.A. , Ansari, M.A. , Watkins, J. , Phelps, Z. , Cross, J. , Butt, T.M. (2009) : Influence of commercial fungicides on the germination, growth and virulence of four species of entomopathogenic fungi, Biocontrol Science and Technology, 19:7, 743-753.

Shukla A.K. (2000) : Impact of Fungicides on soil microbial poplation and enzyme acitivites, Acta Botanica Indica 28:85-87, 2000

SIS = Specialized Information Services, U. S. National Library of Medicine, National Institutes of Health U.S. Department of Health & Human Services (2013). Kann abgerufen werden unter : http:,,chem.sis.nlm.nih.gov,chemidplus,rn,25417-20-3 (Stand 14.05.2014).

Speiser, B. , Stolze, M. , Oehen, B. , Gessler, C. , Weibel, F. P. , Bravin, E. , Kilchenmann, A. , Widmer, A. , Charles, R. , Lang, A. , Stamm, C. , Triloff, P. , Tamm, L. (2013) : Sustainabilty assessment of GM crops in a Swiss agricultural context. In : Agronomy for Sustainable Development, 33,1 ; 21-61.

Squire, G.R. , Brooks, D.R. , Bohan, D.A. , Champion, G.T. , Daniels, R.E. , Haughton, A.J. , Hawes, C. , Heard, M.S. , Hill, M.O. , May, M.J. , Osborne, J.L. , Perry, J.N. , Roy, D.B. , Woiwod, I.P. , Firbank, L.G. (2003) : On the rationale and interpretation of the Farm Scale Evaluations of genetically modified herbicide-tolerant crops. Proceedings of the Royal Society Biological Sciences (2003) 358, 1779–1799.

Stachler, J. , Carlson, A. , Luecke, J. , Boetel, M. , Khan, M. (2010) : Survey of weed control and production practices on sugarbeet in Minnesota and Eastern North Dakota 2010, http:,,www.sbreb.org,.

Strickhof (2012a) : UFA-Revue : Maiszünsler startet durch. Kann abgerufen werden unter : www.strickhof.ch > Über uns > Strickhof in den Medien > UFA Revue 08.02.2012. (Stand 13.06.2014).

Strickhof (2012b) : UFA-Revue : Glyphosat im Acker- und Futterbau. Kann abgerufen werden unter : http:,,www.ufarevue.ch,deu,2012_24919.shtml (Stand 13.06.2014).

Strickhof (2014) : Pflanzenschutzmittel im Feldbau. Kann bezogen werden unter : www.strickhof.ch > Fachwissen > Pflanzenschutzmittel > Broschüre , Mittelheft (Stand 13.06.2014).

Surviliene, E. , Raudonis, L. , Jankauskiene, J. (2009) : Investigation of pesticides effect on pollination of bumblebees in greenhouse tomatoes. Scientific works of the lithuanian institute of horticulture and lithuanian university of agriculture. Sodininkyste ir carzininkyste. 2009. 28(3).

Sweet, J. , Bartsch, D. (2012) : Synthesis and Overview Studies to Evaluate Existing Research and Knowledge on Biological Issues on GM Plants of Relevance to Swiss Environments : National Research Programme 59 « Benefits and Risks of the Deliberate Release of Genetically Modified Plants » : Review of international Literature. vdf Zürich.

swisspatat (2013) : Schweizerische Handelsusanzen für Kartoffeln. Ausgabe 2013. Kann abgerufen werden unter : www.kartoffel.ch,fileadmin,redaktion,pdf,Branchenecke,Informationen,handelsusanzen,HUS_2013_d.pdf (Stand 08.12.2014).

Swisspatat (2014) : Statistiken. Kann abgerufen werden unter : www.swisspatat.ch > Branchenecke > Statistiken (Stand 17.06.2014).

Szankowski, I. , Waidmann, S. , Degenhardt, J. , Patocchi, A. , Paris, R. , Silfverberg-Dilworth, E. , Broggini, G. , Gessler, C. (2009) : Highly scab-resistant transgenic apple lines achieved by introgression of HcrVf2 controlled by different native promoter lengths. Tree Genetics & Genomes April 2009, Volume 5, Issue 2, pp 349-358

Tabashnik BE, Finson N, Groeters FR, et al (1994) Reversal of resistance to Bacillus thuringiensis in Plutella xylostella. Proc Natl Acad Sci U S A 91:4120–4124.

Tabashnik BE, Unnithan GC, Masson L, et al (2009) Asymmetrical cross-resistance between Bacillus thuringiensis toxins Cry1Ac and Cry2Ab in pink bollworm. Proc Natl Acad Sci U S A 106:11889–11894.

Trapman, M. (2006) : Resistance management in Vf apple scab resistant organic apple orchards. [Resistenz Management in Vf Schorf resistente ökologische Apfelanlagen.] In : Boos, Markus (Ed.) ecofruit – 12th International Conference on Cultivation Technique and Phytopathological Problems in Organic Fruit-Growing : Proceedings to the Conference from 31st January to 2nd February 2006 at Weinsberg,Germany, Fördergemeinschaft Ökologischer Obstbau e.V. (FÖKO), Weinsberg, Germany, pp. 108-112.

Traxler, A. , Minarz, E. , Höttinger, H. , Pennerstofer, J., Schmatzberger, A. , Banko, G. , Placer, K. , Hadrobolec, M. , Gaugitsch H. (2005) : Biodiversitätshotspot der Agrarlandschaft als Eckpfeiler für Risikoabschätzung und Monitoring von GVO. Kann abgerufen werden unter : www.bmgf.gv.at > Service > Publikationen bestellen (Stand 16.05.2014).

Turrini, A. , Sbrana, C. , Nuti, M.P. , Pietrangeli, B. , Giovannetti, M. (2004) : Development of a model system to assess the impact of genetically modified corn and aubergine plants on arbuscular mycorrhizal fungi. Plant and Soil 266, 69–75.

University of Hertfordshire (2013a) The Pesticide Properties DataBase (PPDB) developed by the Agriculture & Environment Research Unit (AERU), University of Hertfordshire, 2006-2013.

University of Hertfordshire (2013b) : The Bio-Pesticides Database (BPDB) developed by the Agriculture & Environment Research Unit (AERU), University of Hertfordshire, 2011-2013.

Vanblaere T, Szankowski I, Schaart J, et al (2011) The development of a cisgenic apple plant. J Biotechnol 154:304–311.

van Frankenhuyzen, K. (2009) : Insecticidal activity of *Bacillus thuringiensis* crystal proteins. Journal of Intervebrate Pathology, 101 (2009) 1–16.

Vogt, I. , Wöhner, T. , Richter, K. , Flachowsk, H. , Sundin, G.W. , Wensing, A. , Savory, E.A. , Geider, K. , Day, B. , Hanke, M.V. , Peil, A. (2013) : Gene-for-gene relationship in the host-pathogen system Malus × robusta 5-Erwinia amylovora. New Phytol. 2013 Mar;197(4):1262-75. doi : 10.1111,nph.12094. Epub 2013 Jan 10.

VSKP = Vereinigung Schweizerischer Kartoffelproduzenten (2013) : Jahresbericht 2013. Kann abgerufen werden unter : www.kartoffelproduzenten.ch > Über uns > Jahresberichte (Stand 17.06.2014).

Walter, T. , Eggenberg, S. , Gonseth, Y. , Fivaz, F. , Hedinger, C. , Hofer, G. , Klieber-Kühne, A. , Richner, N. , Schneider, K. , Szerencsits, E. , Wolf, S. (2013) : Operationalisierung der Umweltziele Landwirtschaft : Bereich Ziel- und Leitarten, Lebensräume (OPAL). ART-Schriftenreihe 18, 1-138

Weir, S. M. , Suski, J. G. , Salice, C. J. (2010) : Ecological risk of anthropogenic pollutants to reptiles : Evaluating assumptions of sensitivity and exposure. Environmental Pollution 158 (2010) 3596e3606.

Weltje, L. , Simpson, P. , Gross, M. , Crane, M. , Wheeler, J. (2013) : Comparatative acute and chronic sensitivity of fish and amphibians : a critical review of data, Environmental Toxicology and Chemistry, Vol. 32, No. 5, pp. 984–994, 2013.

Wertz, S. , Degrange, V. , Prosser, J.I. , Poly, F. , Commeaux, C. , Guillaumaud, N. , Le Roux, X. (2007) : Decline of soil microbial diversity does not influence the resistance and resilience of key soil microbial functional groups following a model disturbance. Envrionmental Microbiology Volume 9, Issue 9 September 2007 Pages 2211–2219

Williams, T. , Valle, J. , Vinuela, E. (2003) : Is the Naturally Derived Insecticide Spinosad® Compatible with Insect Natural Enemies ? Biocontrol Science and Technology (August 2003), Vol. 13, No. 5, 459,475.

Wolf, D. , Albisser Vögeli, G. (2009) : Ökonomischer Nutzen von Maïs Btist relativ. Agrarforschung 16(1) : 4-9.

Wolf, D. (2009) : Erfahrungen zum ökonomischen Nutzen herbizidtoleranter Kulturen. Agrarforschung 16(3) : 52-57.

Wolfenbarger, L.L. , Naranjo, S.E. , Lundgren, J. G. , Bitzer, R.J. , Watrud, L.S. (2008) : Bt Crop Effects on Functional Guilds of Non-Target Arthropods : A Meta-Analysis, PLoS ONE 3(5) : e2118. doi:10.1371,journal.pone.0002118

Wolt, J.D. , Peterson, R.K.D. (2010) Prospective formulation of environmental risk assessments : Probabilistic screening for Cry1A(b) maize risk to aquatic insects. Ecotoxicology and Environmental Safety73(2010)1182–1188.

Wüthrich, K. , Oehen, B. , Stolze, M. , Morgner, M. (2006) : Kosten der Vermeidung der Gentechnik für den Lebensmittelhandel beim Anbau von gv Mais in der Schweiz. Teilbericht 2.

Yang, C. , Hamel, C. , Vujanovic, V. , Gan, Y. (2011) : Fungicide : Modes of Action and Possible Impact on Nontarget Microorganisms, ISRN Ecology Volume 2011, Article ID 130289, 8 pages Microbiology 2013, 79(21):6617.

Yoder, J.A. , Condon, M.R. , Heydinger, D.J. , Hedges, B.Z. , Sammataro, D. , Finley-Short, J.V. , Hoffman, G.D. , Olson, E. (2012) : Fungicides reduce symbiotic fungi in bee bread and the beneficial fungi in colonies. In : Sammataro, D. and Yoder, J., editors. Honey Bee Colony Health : Challenges and Sustainable Solutions. Boca Raton, FL. CRC Press. p. 193-214.

Zeng H, Tan F, Shu Y, Zhang, Feng Y, Wang J. The Cry1Ab Protein Has Minor Effects on the Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities after Five Seasons of Continuous Bt Maize Cultivation. PLoS One. 2015 Dec 30;10(12):e0146041.

Zhu X, Gong H, He Q, Zeng Z, Busse JS, Jin W, Bethke PC, Jiang J. (2016) Silencing of vacuolar invertase and asparagine synthetase genes and its impact on acrylamide formation of fried potato products. Plant Biotechnol J. 2016 Feb;14(2):709-18. doi: 10.1111,pbi.12421. Epub 2015 Jun 16.

Textes juridiques :

Koexistenz-Verordnung (Entwurf Vernehmlassung 2013) : Kann abgerufen werden unter http:,,www.news.admin.ch,NSBSubscriber,message,attachments,29421.pdf (Stand 15.07.2014)

DZV (2014) : Verordnung über die Direktzahlungen an die Landwirtschaft Direktzahlungsverordnung ; **SR** 910.13 : Kann abgerufen werden unter www.admin.ch http:,,www.admin.ch,opc,de,classified-compilation,20130216,index.html (Stand 15.07.2014)

Bundesverfassung ; Bundesverfassung der Schweizerischen Eidgenossenschaft ; **SR** 101 : Kann abgerufen werden unter http:,,www.admin.ch,opc,de,classified-compilation,19995395,index.html (Stand 15.07.2014)

VGVL (2005) : Verordnung des EDI über gentechnisch veränderte Lebensmittel ; **SR** 817.022.51 : Kann abgerufen werden unter : http:,,www.admin.ch,opc,de,classified-compilation,20050176,201401010000,817.022.51.pdf (Stand 18.06.2014)

PSMV (2010) : Verordnung über das Inverkehrbringen von Pflanzenschutzmitteln ; **SR** 916.161 : Kann abgerufen werden unter : http:,,www.admin.ch,opc,de,classified-compilation,20100203,index.html (Stand 22.12.2014)

VO (2003) : Verordnung (EG) Nr. 1830,2003 des europäischen Parlaments und des Rates vom 22. September 2003 über die Rückverfolgbarkeit und Kennzeichnung von genetisch veränderten Organismen und über die Rückverfolgbarkeit von aus genetisch veränderten Organismen hergestellten Lebensmitteln und Futtermitteln sowie zur Änderung der Richtlinie 2001,18,EG. Kann abgerufen werden unter : http:,,eur-lex.europa.eu,LexUriServ,LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:268:0024:0028:DE:PDF (Stand 18.06.2014).

7.3 Index des figures

Figure 1. Description et explication du « radar plot ».
Figure 2. Structure du modèle pour les critères socio-économiques.
Figure 3. Structure du modèle pour les critères environnementaux.
Figure 4. Evaluation du maïs Bt résistant à la pyrrale.
Figure 5. Evaluation de la betterave tolérante à un herbicide (HT).
Figure 6. Evaluation de la pomme de terre résistante au mildiou.
Figure 7. Evaluation de la pomme Gala RTFB.
Figure 8. Résuné des variations des différentes composantes de la durabilité en foncation de la variation de l'acceptation (étude de sensibilité du modèle).
Figure 9. Photos de plantes OGM prototypes développées et testées en Suisse.

7.4 Index des tableaux

Tableau 1. Résumé et définitions des critères socio-économiques.
Tableau 2. Résumé et définition des critères environnementaux.
Tableau 3. Description des scénarios analysés par le modèle ADMC.
Tableau 4. Applications des pesticides pour contrôler la pyrale du maïs dans la culture conventionnelle de maïs dans les scénarios A et B.
Tableau 5. Applications de pesticides pour contrôler la pyrale du maïs dans la culture conventionnelle dans le scénario C.
Tableau 6. Applications d'herbicides dans la culture de betterave à sucre pour le scénario A.
Tableau 7. Applications d'herbicides dans la culture de betterave à sucre pour le scénario B.
Tableau 8. Applications de fongicides pour contrôler le mildiou dans la culture de pommes de terre.
Tableau 9. Application de pesticides pour le contrôle de la tavelure et du feu bactérien dans les plantations de pommes.
Tableau 10. Evaluation de sept systèmes de culture contenant des OGM.