



Institut National de la
Recherche Agronomique

**UMR Economie Publique INRA-INAPG
(UMR INRA 210)
BP1, 78850 Grignon
France**



Institut national
agronomique
Paris-Grignon

Rapport Final - APR GICC 2002

Convention de recherche MEDD n°02-00019

I. Rappel des objectifs du projet

Titre du projet

Modélisation intégrée des composantes économique et biophysique des productions végétales en relation avec le changement climatique

Mots-clés : modèle économique, modèle biophysique, courbe de réponse à l'engrais, fertilisation, scénarios économiques et climatiques, échelle européenne, bases de données, SIG.

Thèmes de l'APR concernés : **2.3, 4.2**

Responsable scientifique

Pierre-Alain Jayet, Directeur de Recherche INRA

UMR Economie Publique INRA INA P-G, BP01, Centre INRA de Versailles
Grignon, 78850 Thiverval Grignon

Tel : 01 30 81 53 49 ; fax : 01 30 81 53 68 ; email : jayet@ecgn.grignon.inra.fr

I.1. Résumé du projet

Le présent projet s'inscrit dans la continuité de deux projets financés dans le cadre des APR GICC 1999 et 2001, et dans une **perspective de modélisation intégrée mobilisant modèles et données micro-économiques et agronomiques**. Il s'insère dans les actions clés du présent APR « 2.3 » portant sur l'agriculture, et « 4.2 » portant sur la séquestration du carbone et les changements d'affectation des sols. Il rencontre également la dimension européenne qui est une des caractéristiques de l'APR GICC 2002.

Les deux précédents projets, financés par le programme GICC du MATE, ont mis en avant une approche micro-économique, avec le souci d'intégrer des éléments de modélisation provenant de l'agronomie et de la zootechnie. L'un des points clefs est la possibilité de modéliser, à une échelle compatible avec une prise de décision économique, la relation entre des intrants (engrais organiques ou minéraux) et les rendements des cultures. Le développement de la capacité à mobiliser de façon cohérente et à l'échelle des exploitations types de l'Union Européenne (UE), des bases de données organisées actuellement de manière diverse, et couvrant différents domaines (systèmes économiques, sol, climat, phénologie) constitue l'autre enjeu principal. **Le présent projet vise à se donner les moyens d'une modélisation économique s'appuyant mieux et plus systématiquement sur un modèle agronomique scientifiquement validé, adaptable aux différents systèmes types d'exploitation agricole présents dans l'UE. Le modèle économique utilisé est le modèle d'offre agricole AROPAj maintenant étendu à l'UE à 15, il sera couplé au modèle agronomique STICS.**

Le premier des projets amont, achevé, montre dans quelle mesure il est possible de conduire une analyse économique de l'effet de serre d'origine agricole depuis l'exploitation agricole type jusqu'aux Etats de l'UE. Dans le même temps, une première étape vers la faisabilité du couplage entre un modèle micro-économique et un modèle agronomique a été abordée. L'autre projet, en phase de démarrage, doit contribuer à progresser dans la représentation géographique des résultats économiques en relation avec des critères pédo-climatiques, qui soit accessible aux décideurs publics des politiques agri-environnementales.

L'accès à des informations très complètes, relevant des différents domaines requis par la modélisation, s'avère actuellement possible. Demeurent cependant des problèmes de géoréférencement et d'harmonisation. Ainsi, le Réseau d'Information Comptable Agricole fournit des données micro-économiques pour chaque exploitation agricole type au sein des régions administratives européennes, ces exploitations virtuelles n'étant pas localisables. D'un autre côté, les données des bases « sol » et « climat » (source Centre Commun de Recherche d'Ispra, Italie) sont disponibles à des échelles différentes et distinctes entre elles, ce qui ne rend pas aisé l'attribution de caractéristiques physiques aux exploitations agricoles types retenues par le modèle économique. Via l'utilisation de systèmes d'information géographique, **nous tenterons d'harmoniser ces diverses sources de données. Ceci devrait ensuite nous permettre d'élaborer des fonctions de réponse des rendements des cultures vis à vis des intrants pour les principales**

productions végétales et pour les principaux systèmes types de production agricole de l'UE, avec l'idée de progresser dans les mesures de sensibilité de ces fonctions vis à vis de certains des mécanismes liés au changement climatique.

Enfin, les modèles développés dans le cadre de ce projet sont conçus de façon à s'étendre à moindre coût aux Pays rejoignant l'UE. La plupart des données sont en effet disponibles ou le seront à court terme pour les pays candidats à l'intégration dans l'UE (c'est en particulier le cas pour le RICA (Pays Baltes, Hongrie, ...), ainsi que pour les données « sol » et « climat », et « phénologie »).

I.2. Objectifs et résultats attendus

I.2.1. Objectifs généraux

Le projet s'articule autour de deux attentes principales. Tout d'abord la possibilité de modéliser, à une échelle compatible avec une prise de décision économique, la relation entre des intrants tels que les apports azotés organiques ou minéraux et les rendements des productions végétales. Cette modélisation passe par le développement de la capacité à mobiliser de façon cohérente des ensembles organisés de données couvrant différents domaines (systèmes économiques, sol, climat, phénologie, techniques culturales). En utilisant au mieux les données disponibles, il sera possible d'élaborer des fonctions de réponse des rendements des cultures vis à vis des intrants pour les principales productions végétales et pour les principaux systèmes types de production agricole de l'UE.

Le deuxième volet consiste à étudier les impacts du changement climatique sur le secteur agricole européen. En effet, une fois validées, les fonctions de réponse agronomiques des cultures aux intrants peuvent intégrer des effets attendus du changement climatique, et ce principalement par l'intermédiaire des entrées météorologiques et techniques. Ainsi une analyse agro-environnementale et économique des impacts du changement climatique est envisagée.

I.2.2. Objectifs détaillés, résultats attendus

L'objectif agronomique du travail (réalisé par les équipes d'Avignon et de Grignon) est de générer des courbes de réponses du rendement à la fertilisation azotée. Ces courbes dépendent des conditions de sol (matière organique, argile, calcaire), du climat et de l'itinéraire technique (apports de résidus organiques et en particulier d'effluents d'élevage, date de semis, précocité des variétés, irrigation). Si l'on peut espérer s'appuyer, à l'échelle européenne, sur des bases de données sol et climat, il reste des incertitudes au niveau de l'itinéraire technique, difficile à obtenir.

Il s'agit donc de tester des méthodes d'assimilation de l'information économique (rendement, coût de fertilisation minérale) permettant d'estimer les éléments techniques manquants. Ces méthodes reposent sur une modalité « fertilisation automatique » calculée par le modèle pour respecter un niveau de satisfaction des besoins azotés imposé en entrée. Il conviendra d'améliorer cette modalité afin qu'elle reproduise au mieux des calendriers de fertilisation réels. Il sera nécessaire de convertir « de façon automatique » les informations économiques disponibles (rendement, coût des engrais) en information

agronomique intégrable dans le modèle (rendement standard, quantité d'azote). On pourra ensuite éventuellement tester différentes méthodes d'assimilation (optimisation).

Enfin l'utilisation du modèle « en direct » pour générer les courbes de réponses devra être confrontée à des résultats d'essais de fertilisation et à des simulations utilisant des calendriers de fertilisation recommandés par les professionnels.

Le travail relevant de l'économie consistera à automatiser la méthode et à l'utiliser dans le contexte de la base de données économiques, pour quelques régions types et « exploitations agricoles types » puis de réaliser le couplage avec le modèle AROPAj. Le cœur de ce couplage sera constitué des paramètres des formes fonctionnelles des réponses du rendement à l'azote, pour les principales cultures et les exploitations types du modèle pour l'UE dans son ensemble.

Une harmonisation des diverses bases de données, pédoclimatiques d'un côté et économiques de l'autre sera indispensable, sachant que nous devons utiliser des données spatialisées et des typologies à l'intérieur d'unités spatiales (cas des exploitations types des régions administratives européennes et cas des sols selon la précision requise).

L'élaboration des règles de pédotransfert adaptées aux données sols européennes pour dériver les variables d'entrée sols au modèle de culture STICS constitue une attente clé, afin de produire des résultats adaptés aux besoins du modèle STICS.

La mise en œuvre de SIG permettra le croisement des données sols avec les autres données nécessaires à la modélisation (climat, occupation du sol, pratiques agricoles) pour la définition des unités spatiales de simulation pour le modèle STICS. Différentes possibilités de détermination des données sols utilisées dans les unités de simulation seront testées. Il s'agira notamment de tester différentes manières de lier les données sols aux données socio-économiques : sol dominant dans la région, répartition au prorata des surfaces, essai de détermination de relations entre les sols et les types d'exploitation. L'utilisation de données sur l'occupation du sol (CORINE Land Cover) et sur le relief (Modèle Numérique de Terrain – MNT - au pas de 1 km) sera testée pour essayer de préciser la répartition spatiale des exploitations du RICA au sein des régions.

Cependant, une fois les variables d'entrée pour les sols déterminées, il reste à définir les unités de simulation. En effet, le modèle STICS a besoin de variables d'entrée sur les sols, le climat, les cultures et les pratiques agricoles. Or, les données disponibles au niveau européen pour la détermination de ces variables sont très différentes sur le plan de la résolution géographique. Les données sols sont disponibles sous la forme d'association de sols dont la délimitation est cartographiée sous forme de polygones de sol à l'échelle du 1/1 000 000. Les données climatiques sont issues d'une interpolation sur une grille de maille 50 km x 50 km de données climatiques ponctuelles. Quant aux données sur les cultures et les pratiques agricoles, elles seront issues de la base de données RICA dont la résolution géographique est la région administrative. La définition des unités de simulation nécessitera le croisement géographique des différentes données et le choix d'une méthode d'attribution des données sols et climat aux ensembles des exploitations de la base RICA. Plusieurs méthodes d'attribution seront testées afin de déterminer l'influence de la variabilité spatiale des sols sur la sensibilité du modèle. Nous pourrions

nous appuyer sur l'expérience acquise sur d'autres projets (Le Bas et King, 1997 ; Le Bas et al., 1998 ; Le Bas et al., 2000 ; Donet et al., 2000 ;) tant en matière de croisement de données sols et climat que sur la détermination des données sols dans les unités de simulation.

Nous envisageons donc l'utilisation d'un système d'information géographique pour l'exploitation effective des modèles, pour une région, pour un pays, puis pour l'ensemble de la communauté européenne.



Institut National de la
Recherche Agronomique



Institut national
agronomique
Paris-Grignon

**UMR Economie Publique INRA-INAPG
(UMR INRA 210)
BP1, 78850 Grignon
France**

Rapport Final - APR GICC 2002

Convention de recherche MEDD n°02-00019

Modélisation intégrée des composantes économique et biophysique
des productions végétales en relation avec le changement climatique

Godard C., Jayet P.A., Niang B., Bamière L., De Cara S., Debove E., Baranger E.
UMR Economie Publique INRA-INA P-G, Grignon

Brisson N., Ripoche D., *Unité CSE INRA Avignon*

Le Bas C., Arrouays D., *Unité Infosol, INRA Orléans*

II. Réalisation du programme



Institut National de la
Recherche Agronomique

**UMR Economie Publique INRA-INAPG
(UMR INRA 210)
BP1, 78850 Grignon
France**



Institut national
agronomique
Paris-Grignon

II.1. Résumé

1 à 2 pages français et anglais

L'analyse et l'évaluation des impacts de la régulation économique et des modifications du milieu sur le secteur de production agricole devraient tenir compte de la grande diversité des systèmes de production. Par ailleurs ces systèmes eux-mêmes sont complexes, offrant une grande variété de produits utilisant des intrants eux-mêmes très divers.

A l'image de ce qui est fait dans d'autres secteurs, en matière de changement climatique, on s'est d'abord intéressé aux émissions de gaz à effet de serre d'origine agricole, et aux impacts de mesures visant à les réduire. L'originalité de l'agriculture tient au fait que ces émissions relèvent en premier lieu de deux gaz « non-CO₂ ». Le présent projet aborde le chapitre des rétro-actions du milieu sur les systèmes de production, et s'intéresse en particulier aux effets du climat sur les relations entre intrants (azote) et produits (végétaux). Il s'agit de se donner les moyens d'évaluer les transformations de ces relations, en mobilisant les modèles « génériques » et les données « homogènes » disponibles à l'échelle européenne. La méthodologie retenue repose en grande partie sur ces notions de généricité et d'homogénéité.

A côté des modèles économiques de type macro-économétrique sectoriel ou de type d'équilibre général, les modèles de programmation mathématique représentent les systèmes à différentes échelles en partant d'exploitations agricoles type bien spécifiées. Le modèle AROPAj est de cette facture, permettant une représentation de l'offre agricole fondée sur une typologie régionale des exploitations. C'est un modèle générique adaptable à différentes orientations techniques existant dans l'Union Européenne. On peut le décliner en autant de modèles types que les observations disponibles le permettent. Ces observations, fournies par le Réseau d'Information Comptable Agricole (RICA), sont essentiellement d'ordre comptable et micro-économique, alors que le modèle s'appuie également sur des éléments techniques.

La qualité de la représentation des ensembles de production (i.e. les ensembles de valeurs réalisables que peuvent prendre les variables de commande des systèmes) dépend donc étroitement de la qualité des relations techniques introduites dans le modèle économique. Nous nous intéressons ici aux relations entre rendements végétaux et intrants azotés, qui, initialement, sont limités à un couple de valeurs (dépendant de l'exploitation type et du type de production). L'intérêt d'un modèle

générique de culture conduit à un mode de relation formellement homogène, et donc plus aisément transposable dans le modèle AROPAj. Dans le même temps, il restitue, comme le permet la modélisation agronomique, la diversité des productions et des éléments pédo-climatiques et phénologiques.

Le principal résultat du programme que nous avons réalisé dans le cadre GICC est de montrer comment le couplage externe entre les modèles AROPAj et STICS est rendu opérationnel, et comment les résultats du modèle économique en sont affectés. Toute la méthodologie est en place pour réaliser des simulations portant par exemple sur les effets de l'intervention économique (telle que la taxation différenciée de l'azote, selon les régions par exemple), et sur les effets de la modification des courbes de réponse (imputables au climat). Parmi les résultats associés, nous mettons en avant la conception et l'utilisation d'une base de données (ArTix) permettant l'interfaçage des modèles, avec comme champ d'application l'Union Européenne, et comme échelle de travail les groupes types d'exploitations agricoles au sein des Régions « RICA » (proches de « NUTS2 »).

Les équipes participantes appartiennent à l'INRA. Ce sont l'UMR d'économie publique INRA-INA 5grignon, Centre de Versailles-Grignon ; l'unité CSE d'Avignon, et l'Unité INFOSOL d'Orléans. La première Unité est rattachée au Département SAE2 (Sciences Sociales), les deux autres au Département Environnement-Agronomie.

**UMR Economie Publique INRA-INAPG
(UMR INRA 210)
BP1, 78850 Grignon
France**

II.2. Méthodologie et résultats

Nous faisons état dans cette section des résultats obtenus, en regard des objectifs annoncés.

La première sous-section porte sur les développements méthodologiques et pratiques, qui conditionnent la viabilité de l'ensemble de la démarche. Ces développements concernent tout ce qui a trait au couplage effectif des modèles, autour de la notion clé de courbe de réponse des rendements des cultures vis-à-vis des apports d'azote.

La deuxième sous-section porte sur la conception et la réalisation de la base de données ArTix, qui constitue à la fois un investissement et un résultat important pour l'ensemble du programme. La troisième sous-section porte sur l'apport spécifique que constituent les travaux de pédologie.

La quatrième sous-section aborde ce qui est le second objectif du programme initialement défini, à savoir l'impact du changement climatique sur les courbes de réponse, et partant, sur les systèmes de production agricoles (toutes choses égales par ailleurs).

Tous les éléments sont enfin redevables à des programmes européens en cours, en particulier les STREPs GENEDEC et INSEA.

II.2.1 Travaux méthodologiques pour la construction de la réponse à l'azote des cultures, résultats obtenus

Le premier objectif de ce programme de recherche est l'élaboration des courbes de réponse des rendements lorsque varient les apports d'engrais azotés.

En ce qui concerne la construction de ces courbes de réponse pour les différentes cultures européennes, les travaux réalisés ont abouti à la mise au point d'une méthode qui permet un certain niveau de couplage entre les modèles AROPAj et STICS. Notre proposition méthodologique a été validée pour plusieurs cultures et groupes-types (Godard et al., 2005a.). Le couplage entre dans sa phase opérationnelle, grâce au développement d'une base de données et de procédures informatiques associées à cette base et à l'exécution en « boucle » du modèle STICS.

Ce travail a été réalisé principalement à l'UMR Economie Publique à Grignon dans le cadre de la thèse de Caroline Godard, avec l'appui de Nadine Brisson et de

Dominique Ripoche de l'Unité Climat Sol et Environnement de l'INRA d'Avignon, et l'appui de Christine Le Bas et de Dominique Arrouays de l'Unité INFOSOL de l'INRA d'Orléans.

Le choix des régions sur lesquelles sont effectués les tests concernant les « règles » d'attribution des entrées du modèle STICS, ainsi que la méthode de couplage ont été faits selon plusieurs critères. Tout d'abord, les régions test sont situées en France pour d'une part pouvoir disposer rapidement des informations techniques, et d'autre part avoir facilement accès à des sources variées d'informations pour constituer une base de validation. Ensuite, pour avoir des conditions techniques (cultures pratiquées, irrigation, présence ou non d'élevage) et de milieu (climat, sol et altitude) variées, et couvrir autant que possible les cas de « groupes types » potentiellement rencontrés, nous avons considéré les régions Picardie, Aquitaine, Auvergne et Provence-Alpes-Côte d'Azur.

Parmi les entrées nécessaires au fonctionnement de STICS, nous avons distingué :

- les entrées forcées : i.e. celles pour lesquelles on fixe une règle d'attribution en fonction des données disponibles
- les entrées ajustées sur les caractéristiques économiques attendues de la courbe de réponse, i.e. celles pour lesquelles on ne fixe pas a priori de règle d'attribution, mais dont on limite le champ des valeurs prises possibles
- les entrées qui concernent les apports azotés et qui ont un statut particulier puisqu'elles constituent les variables d'intérêt mises en relation avec les sorties du modèle.

En fonction des données disponibles, des informations sur la localisation ou le mode de conduite que l'on peut tirer de la typologie des exploitations virtuelles, nous avons déterminé et avons validé les règles qui permettent d'attribuer les valeurs des à chacune de ces exploitations.

Tout d'abord, afin d'utiliser au mieux les informations à notre disposition pour les groupes types d'exploitations agricoles du modèle AROPAj (selon une typologie qui résulte d'une combinaison de classes d'altitude et d'Orientations Technico-Economiques-OTE), nous avons calculé une classe d'altitude moyenne par groupe type. Une moyenne pondérée des effectifs des populations de référence du RICA présentes dans chaque classe d'altitude pour chaque groupe type a ainsi permis de définir une classe d'altitude moyenne pour chacun. Pour caractériser les OTE de chaque groupe, nous avons simplifié la classification en ne considérant que deux « types » d'OTE. Les exploitations types qui ont au moins une OTE ayant des animaux sont considérées comme « éleveur », les exploitations types n'ayant que des OTE représentant des cultures sont classées comme « cultivateur ». Ainsi caractérisées, les exploitations type peuvent plus facilement se voir attribuer un

itinéraire technique, voire également faire l'objet d'hypothèses quant à leur localisation au sein de leur région (voir travail réalisé dans le cadre du projet Spatialisation des impacts de la régulation économique de l'effet de serre d'origine agricole, en réponse à l'APR GICC 2001).

La méthode de construction de la courbe proprement dite tient compte des apports d'azote issus des engrais de synthèse et des déjections animales. Nous avons également cherché à nous affranchir en partie dans un premier temps des problèmes causés par l'évaluation des quantités d'azote à partir du poste engrais des charges variables (estimation faite à partir des données du RICA). Cela nous permet, dès la phase de détermination des entrées de STICS, d'explorer des gammes plus grandes d'apports azotés issus des engrais.

II.2.1.1. Les étapes de la méthode proposée

(1) 1ère étape : « calibrage » des 2 modèles, avec la définition des entrées d'AROPAj et de STICS

Pour chaque culture de chaque groupe-type, on définit des entrées potentielles pour STICS (méthodes détaillées en annexe A), elles sont décrites brièvement dans le tableau ci-dessous.

| Type d'entrée | Modalités | Mode de définition |
|--------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Climat | 1 | 1 fichier climatique : attribué avec la classe d'altitude |
| Sols | 5 | sols potentiels : critère : 5 unités de sol « STICS » ayant les plus grandes surfaces régionales. On appelle unités de sol STICS le regroupement de sols de la base européenne considérés comme identiques du point de vue des variables d'entrée sols de STICS |
| Variétés | 3 ou 1 | Selon la culture, variétés et dates de semis ont 3 modalités en tout |
| Date de semis | 1 ou 3 | |
| Précédents | 2 | blé ou pois |
| Apports d'engrais de synthèse | Types fixés Doses variables | 1 type d'engrais de fond et 1 type d'engrais cours de culture (selon le type de plante et les pratiques régionales), fractionnement en fonction de la dose totale apportée selon la culture, dates d'apports en fonction des stades sensibles donnés en °j. |

| | | |
|--------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Irrigation | 1 ou 2 | oui ou non : détermination en fonction des priorités vis-à-vis de l'eau et de la surface irriguée de l'exploitation, ajustement automatique, si irrigué, $ratiol = 1$, (Cf. définition Annexe A). |
| Apports organiques | | quantité donnée par AROPAj, qualité fixée selon type d'animaux producteurs et quantité annuelle produite (Cf. Annexe B). |
| Nombre total de simulations pour une dose d'azote d'engrais de synthèse | $1 \times 5 \times 3 \times 2 \times 1 = 30$ ou $1 \times 5 \times 3 \times 2 \times 2 = 60$ | |

Dans cette étape, le modèle AROPAJ fonctionne « en amont » du couplage, dans sa version actuelle, i.e. sans intégration de courbe de réponse des cultures à l'azote. Les rendements ne sont pas fonction des intrants azotés : ils sont maintenus à leur valeur estimée (r^*) à partir des valeurs comptables du RICA. De même, les quantités d'engrais synthétiques obtenues à partir des valeurs estimées des charges variables sont maintenues à leur valeur d'estimation, et ce, quels que soient les changements de conditions de production. La marge brute du producteur est optimisée, suivant en cela le modèle économique. Pour chaque culture, nous prenons en compte les apports azotés issus des engrais synthétiques et des déjections animales produites sur l'exploitation. Pour cela, nous utilisons un bilan azoté simplifié qui repose sur les besoins de la culture (basés sur le rendement référence, r^* , valeur estimée à partir du RICA comme rendement espéré) :

Besoins annuels culture = fourniture de l'engrais + fourniture du précédent + fourniture des déjections

NB : Pour calculer la quantité d'azote issue des déjections, on utilise des « coefficients d'équivalence azote » références données par culture et par type de déjection (fumier/lisier/fiente et type d'animal) (Cf. annexe B.).

Au préalable, un test sur la couverture ou non des besoins de la culture en P_2O_5 et K_2O par les engrais de ferme est effectué. Ceci permet de définir si un engrais de fond de synthèse est apporté.

Remarque : pour faire ce test, on utilise les valeurs pré-estimées des surfaces affectées aux cultures, et les valeurs des effectifs animaux qui sont des données du fichier de paramètres d'AROPAJ (le fichier « mgg.par ») tel qu'il est actuellement, c'est-à-dire que les valeurs sont issues de la phase de calibrage d'AROPAJ et que ce ne sont pas les sorties définitives du modèle économique.

En « sortie », AROPAj va donc fournir une quantité de chaque type de déjection fournie à la culture étudiée. Tout le travail sur cet aspect du couplage a été réalisé en collaboration avec Laure Bamière (ingénieur de recherche à l'UMR Economie Publique).

Dans un deuxième temps, il s'agit de faire une sélection parmi les entrées potentielles de STICS concernant le milieu physique et le précédent, pour cela :

- On fait varier la dose d'engrais synthétique en cours de culture apportée en entrée de STICS, toutes les autres entrées prenant les valeurs potentielles fixées plus haut (d'où 30 – ou éventuellement 60 – simulations qui apparaissent en référence des points de la figure 3).
- On représente alors les rendements obtenus (ordonnées du graphe de la figure 1) en fonction de la quantité d'azote (en unités) issue de l'engrais synthétique en cours de culture (abscisses du graphe de la figure 1).
- Sur ces points, on ajuste une courbe de la forme $r = B - (B - A) e^{-\tau N}$ (avec : r = rendement, N = quantité d'azote appliquée issue de l'engrais en cours de culture). (méthode statistique mise en oeuvre : Cf. § II.2.1.2.)
- Une fois les différentes courbes tracées, on détermine les conditions potentielles qui satisfont le mieux aux critères suivants dans l'ordre :
 - o Le rendement r^* (rendement de référence, issu du calibrage, se trouvant dans le fichier « mgg.par », et représenté par l'horizontale de la figure 1) est atteint
 - o 2) Au point d'intersection de la droite horizontale $r=r^*$ avec la courbe $r(N)$, la valeur de la dérivée $r'(N)$ est calculée : l'écart de la valeur de cette dérivée à w/p (valeur du rapport du prix d'achat de l'azote issu de l'engrais synthétique appliqué en cours de culture sur le prix de vente de la culture, représentée par la double flèche sur la figure 1) est minimal.

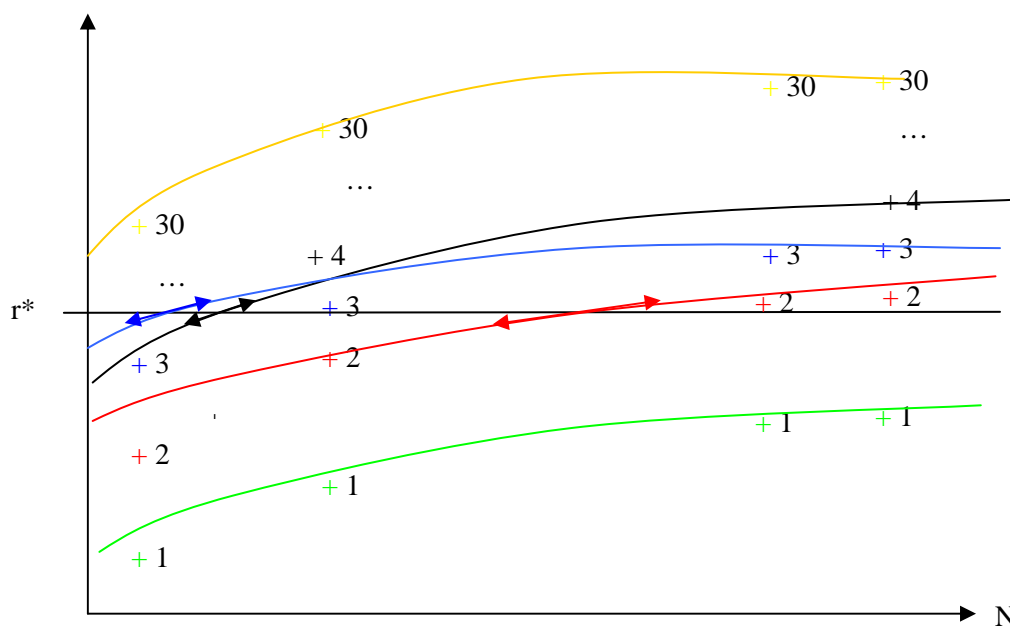


Figure 1. Illustration des étapes permettant la sélection des entrées de STICS

A la fin de cette première étape de calibrage, on a fixé les entrées de STICS :

- 1 sol
- 1 variété ou 1 date de semis
- 1 précédent
- le mode d'irrigation

(2) 2ème étape : génération des courbes pour l'endogénéisation des rendements dans AROPAj (i.e. mode de calcul intégrant la réponse à l'azote et ce, de manière interne au modèle économique)

★ Génération des courbes de réponse à l'engrais azoté synthétique

- On fournit à STICS des entrées « azotées » issues uniquement de doses croissantes d'engrais en cours de culture (toutes les autres données sont fixées aux valeurs déterminées dans l'étape précédente, et on ne fait pas d'apport d'engrais de ferme, ni d'engrais de fond azoté).
- On ajuste sur les points $(r ; N)$ (où N représente la quantité totale d'azote apportée issue de l'engrais), une courbe de la forme $r = \beta - (\beta - \alpha) e^{-\alpha N}$ (on reprend la même méthode statistique que précédemment pour l'ajustement de la courbe).

★ Génération des courbes de réponse aux déjections animales

- On ne fournit à STICS que des entrées azotées « déjections animales », c'est-à-dire que l'on n'apporte pas d'autres formes d'azote (hormis le précédent qui reste toujours fixe); les autres entrées techniques et physiques sont toujours celles déterminées lors de l'étape 1 (« calibrage »).
- On ajuste sur les points $(r;D)$ (où D représente la quantité totale d'azote présent initialement dans la déjection apportée), une courbe de la forme $r = \beta - (\beta - \alpha) e^{-TD}$ (on reprend toujours la même méthode l'ajustement de la courbe, et les coefficients α et β et sont identiques à ceux de la courbe de réponse à l'azote provenant de l'engrais).

★ Détermination, pour chaque type de déjection et chaque engrais du « coefficient d'équivalence azote » (cf. figure 2)

A partir des deux types de courbes précédentes, on peut déterminer pour chaque couple (déjection, engrais), et ce, dans des conditions pédoclimatiques et techniques propres à chaque groupe-type et chaque culture un coefficient d'équivalence azote : i.e. être capable de déterminer, pour chaque quantité d'azote provenant de chaque type de déjection, la quantité équivalente en terme de rendement produit, d'azote issu d'un type d'engrais synthétique donné. Compte tenu de l'hypothèse faite sur les rendements minimum et maximum (respectivement α et β), ce coefficient s'exprime par le rapport T/t .

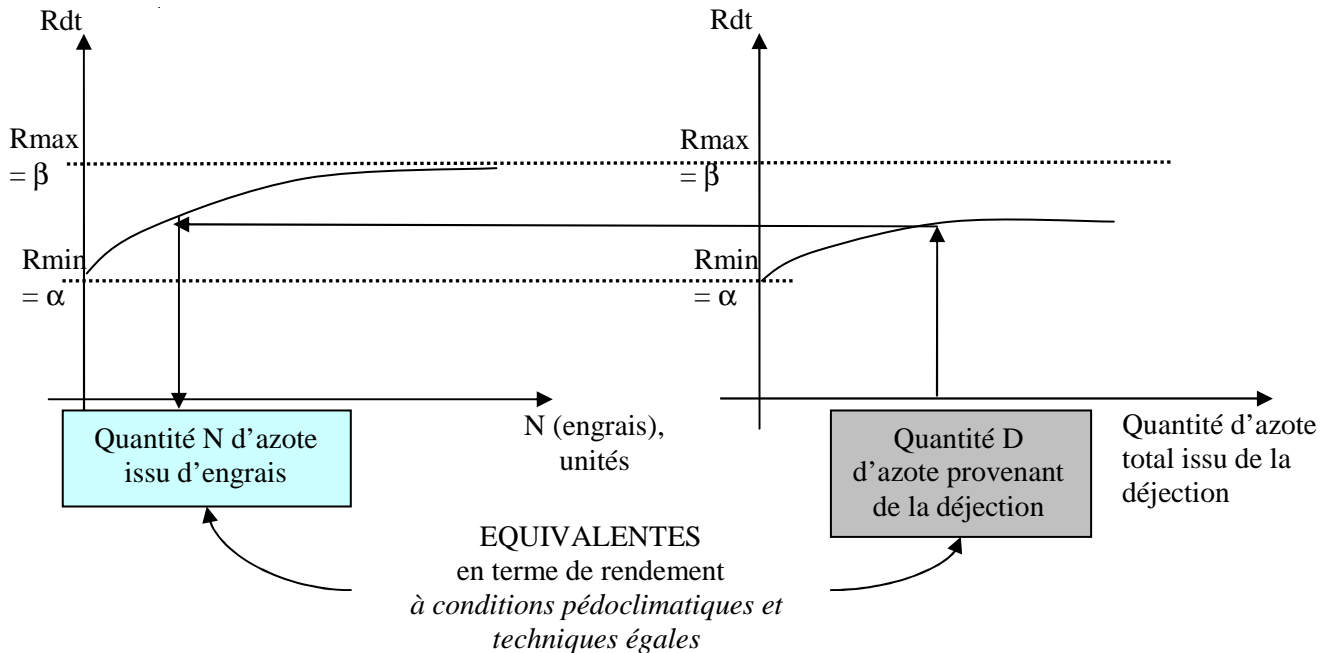


Figure 2 : Principe du coefficient d'équivalence azote

A l'issue de cette étape, on a déterminé un et un seul coefficient par groupe-type et par culture et pour chaque déjection (les types de déjection et leurs caractéristiques ont été fixés à partir des catégories animales présentes dans le modèle économique, cf. Annexe A et B).

★ Intégration des courbes dans AROPAj :

On n'intègre dans AROPAj qu'une seule courbe $r(N)$ et on prend en compte les apports d'engrais de ferme via les coefficients d'équivalence azote définis précédemment. Il n'y a, en routine dans AROPAj, qu'une seule courbe de réponse à l'azote (azote acheté issu de l'engrais synthétique). L'intégration des différents apports d'azote tient à l'élaboration proprement dite dans le modèle économique du module associé à l'azote, et à la « paramétrisation » des courbes (y compris les paramètres associés aux « équivalents » azote des apports organiques d'origine animale).

Du point de vue économique, la fonction de réponse est idéalement positive, monotone croissante et concave. Du fait de son adaptabilité à des contextes pédo-climatiques très variés, le modèle agronomique de cultures STICS a été retenu pour

être capable de fournir les relations attendues pour un grand nombre de cultures, relations qu'il est possible de rendre explicites dans le modèle économique AROPAj. La forme finalement retenue est la forme exponentielle $r = B - (B-A) e^{-t/N}$ où r est la fonction de rendement, N la quantité d'azote total apporté à la culture, A la valeur du rendement sans apport azoté, et B sa valeur asymptotique quand l'apport devient grand, et t la «vitesse» à laquelle est atteint le rendement maximal. L'insertion des fonctions de réponse dans le modèle AROPAj suit un processus en trois étapes.

1. Le modèle AROPAj est modifié, avec l'introduction d'un module « azote » associant de nouvelles activités (i.e. de nouvelles variables de commande du modèle, participant à l'optimisation de la marge brute) telles que les apports d'azote, et les contraintes de satisfaction des besoins (combinant apports et besoins propres à chaque culture, ceux-ci étant associés aux rendements).
2. Préalable à l'introduction des fonctions de réponse, le calibrage du modèle AROPAj pour chacune des exploitations agricoles type représentées n'est pas remis en cause. Il convient donc d'ajuster les courbes de réponse, de sorte que chacune d'entre elle passe par le « point de calibrage » défini par le rendement de la culture (estimé à partir des données du RICA) et par la valeur de la pente de la tangente en ce point, égale au rapport du prix de l'azote sur le prix du produit. En réalité, on maintient la valeur des paramètres A et B à leur valeur donnée par STICS et plus précisément par la valeur des paramètres A et B de la « meilleure » fonction de réponse parmi les fonctions de réponse possibles (Fig. 3, et Godard et al, 2005a). Seul, le paramètre de courbure t est modifié (Fig. 4).
3. Enfin, l'optimisation via AROPAj est réalisée en deux temps. Avec l'hypothèse de prix implicites du produit (la culture) et du facteur (l'azote) égaux aux prix de marché, on détermine le rendement optimal et l'apport optimal en azote pour chacune des cultures et pour chaque ferme type pour lesquelles on dispose de fonctions de réponse. Les valeurs de rendement et de charges se substituent alors aux valeurs initiales, et les programmes linéaires du modèle AROPAj sont résolus avec les outils habituels (générateur de matrices et solveur). On démontre que l'hypothèse précitée est vérifiée dès lors que, dans la solution du problème (i.e. les surfaces, productions, collectes, autoconsommations à l'optimum), le produit doit être en tout ou partie collecté, et l'azote doit être en tout ou partie acheté (ce qui est implicitement le cas tant que les apports d'azote internes à l'exploitation – provenant des effluents d'élevage – ne sont pas pris en compte dans le modèle). A défaut, la solution exacte du problème demanderait un mode de résolution itératif, avec la détermination des prix implicites calculables en programmation linéaire (via les variables « duales » de l'optimisation sous contrainte), puis l'utilisation de ces prix pour le calcul du rendement et de l'apport, et enfin s'appuyer sur la comparaison avec les prix implicites recalculés à l'étape suivante de la programmation linéaire pour poursuivre ou arrêter le processus itératif.

En réalité, l'étape 3 du processus peut être intuitivement analysée de la façon suivante. Si la solution d'un programme linéaire conduit à une surface strictement positive allouée à une culture, il est normal que, toutes choses égales par ailleurs, la marge brute par hectare soit la plus élevée possible, conduisant à une optimisation du rendement et de l'apport tels que définis ci-dessus. Le mode de résolution du problème, qui en théorie n'est plus linéaire, permet en réalité d'utiliser les algorithmes et les solveurs de la programmation linéaire, avec peu de modification sur la structure du modèle.

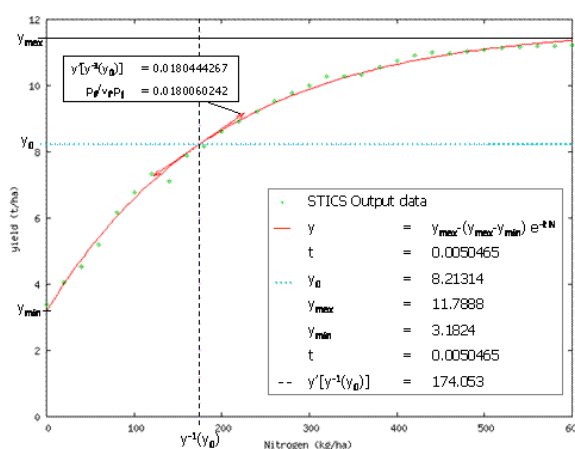


Figure 3. Exemple de fonction de réponse pour le blé tendre chez une ferme type "grandes cultures" en Picardie.

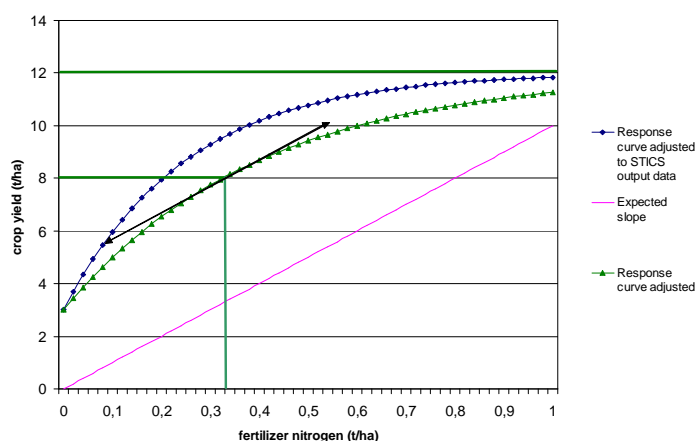


Figure 4. Ajustement de la fonction de réponse STICS compatible avec le modèle calibré sur la base des rendement et charge variable de référence.

La méthode proposée permet d'intégrer les apports organiques, tout en ne conservant qu'une seule et même courbe de réponse à l'azote pour le modèle économique. En établissant des coefficients d'équivalence azote plus adaptés aux conditions pédoclimatiques propres à chaque exploitation type étudiée, nous espérons pouvoir mieux prendre en compte leur effet sur le rendement. En « traduisant » de manière équivalente les effets sur le rendement de deux sources d'azote sans passer par deux variables, nous pouvons ainsi conserver une fonction de réponse finale en deux dimensions (plus facile à introduire dans le modèle économique sous sa forme actuelle). En s'affranchissant des charges en engrais dans l'étape de « calibrage » du couplage des deux modèles, nous avons semble-t-il une marge de manœuvre plus grande pour approcher le point (r^* , N^*). La question de la prise en compte de ce point, et donc de la valeur des charges variables en engrais, a été traitée par l'étape 3 d'ajustement exposée ci-dessus, lorsqu'a été évoquée l'introduction de la courbe dans le modèle économique. En effet, il s'agit bien de prendre en compte ce point qui constitue l'état actuel du modèle économique, et la courbe de réponse à l'azote proposée passe par ce point, pour ne pas remettre en cause le calibrage proprement dit du modèle AROPAj. D'où l'étape importante de validation de la quantité d'engrais apportée, déterminée à partir des charges, pour l'utilisation de la courbe de réponse par le modèle économique.

Une première application de la méthode a porté sur la mise en évidence de la modification de l'offre de réduction des émissions de gaz à effet de serre lorsque sont introduites des courbes de réponse dans le modèle économique. Nous disposons d'un premier jeu de courbes de réponse pour quelques cultures concernant les groupes types de la Région Picardie (Godard et al., 2005a).

Cette méthode nous permet aussi de proposer une certaine validation de l'existant en ce qui concerne les charges en engrais et les rendements dans le modèle économique.

II.2.1.2. La mise en œuvre pratique...

...Automatisation

La mise en œuvre pratique de la méthode proposée nécessite de pouvoir générer un grand nombre de points (r ; N) qui correspondent chacun à une simulation de STICS, et donc à autant de fichiers « techniques » où est entrée la quantité d'azote apportée. Pour cela, une base de données ainsi qu'une application associée ont été développées à l'UMR Economie Publique par N'deye Bineta Niang, les détails en sont présentés dans la section suivante B1.2.

...et aspects statistiques

L'ajustement des courbes sur les points pseudo-expérimentaux issus des simulations de STICS est faite via le logiciel SAS. La procédure utilisée est « NLIN » : elle ajuste un modèle non linéaire à un nuage de points en utilisant les moindres carrés comme critère.

Cette méthodologie permet la « traduction » des données physiques et agronomiques en terme de rendement et donc de résultats économiques, aussi bien pour les apports d'azote minéral que pour les apports d'azote organique. En se basant sur des outils informatiques et statistiques, elle fournit les résultats attendus concernant la courbe de réponse à l'azote des différentes cultures du modèle économique pour les groupes types des régions tests.

II.2.2 ArTix : base de données et solution logicielle autour du couplage de Stics et du modèle économique AROPAj

Afin de pouvoir gérer de manière harmonisée et automatique les données et informations nécessaires aux fonctionnements conjoints des deux modèles, l'élaboration et l'organisation d'un système informatique sont incontournables. Ce travail est réalisé par N'deye Bineta Niang, qui a été embauchée pour une durée de 12 mois grâce au financement du présent projet, puis qui a prolongé ses travaux grâce au financement du programme européen GENEDEC.

Face à un volume important de données à traiter pour des milliers de simulations Stics, la base de données et l'application ArTix ont été créées dans le cadre du couplage entre Stics et le modèle économique AROPAj.

Le modèle économique impose l'échelle des exploitations agricoles types (virtuelles, définies statistiquement pour chaque région dont elles représentent la diversité des systèmes de production). Le travail de simulation à l'aide de Stics s'effectue exploitation-type par exploitation-type, culture par culture, et ce pour toutes les régions de l'Union Européenne. Concrètement, il s'agit pour chaque exploitation-type de simuler la réponse à l'azote d'une dizaine de cultures, chacune sur 5 sols de caractéristiques différentes, avec 2 précédents culturaux. Selon la culture, une variété et trois dates de semis ont été considérées (cas du colza, de la betterave, de la pomme de terre et des blés), ou bien trois variétés et une date de semis (cas des maïs et du tournesol). L'irrigation a également été prise en compte (voir les détails de ces itinéraires techniques dans Godard et al., 2005 b.). Sont donc effectuées 155 ou 310 simulations par exploitation-type et variété (irrigation

ou non, variations des apports azote de 0 à 600 unités/ha) pour chacune des 734 exploitations types.

Les données RICA (Réseau d'Information Comptable Agricole) utilisées par AROPAj et à partir desquelles sont définies les exploitations-types sont essentiellement de nature comptable. Les informations indispensables à Stics (conditions de sol, climat, itinéraire technique) doivent donc provenir de sources alternatives. ArTix réalise, en amont de toutes les simulations, la gestion et la mise en forme de l'ensemble des données.

ArTix offre donc un stockage structuré de toute l'information et un regroupement des traitements nécessaires au couplage.

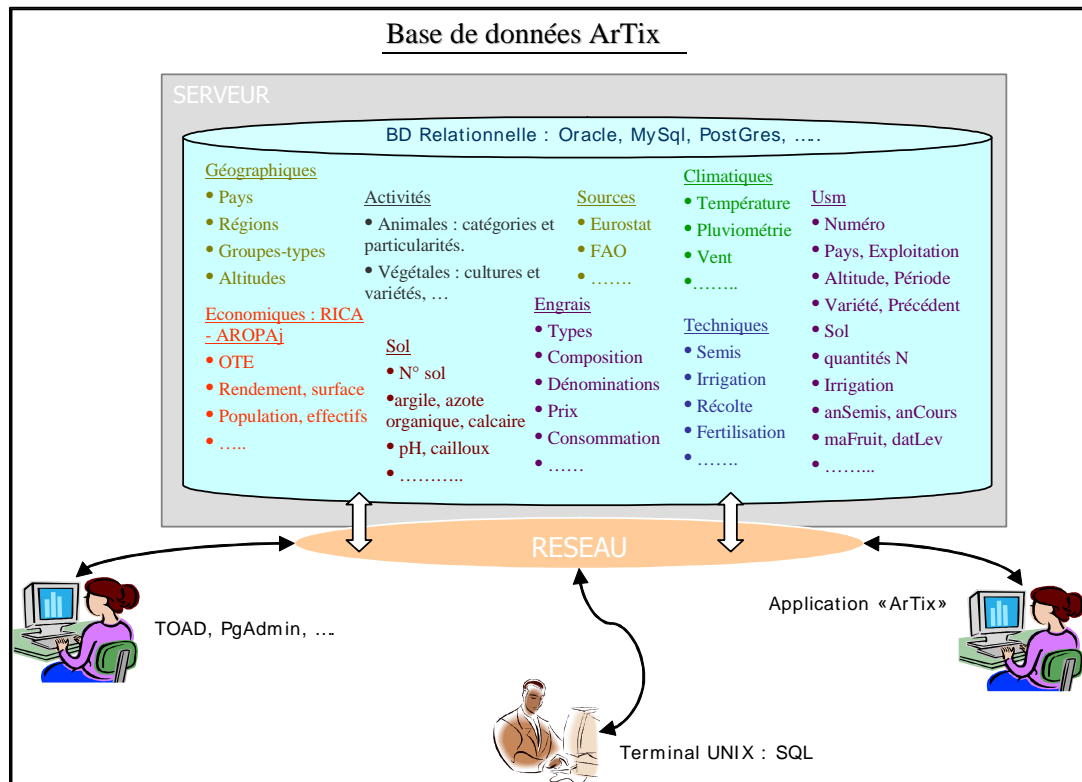
II.2.2.1. La base de données ArTix

De type relationnel, Artix a d'abord été mise en place sous Oracle, avant d'être migrée sur PostGresql. Elle rassemble les entrées nécessaires à AROPAj d'une part, et d'autre part provenant de base de données fournies par divers partenaires (INRA Orléans, Joint Research Center d'Ispra en Italie) et d'autres organisations (Eurostat, FAO, ...). Elle contient les paramètres issus de l'estimation et/ou du calibrage d'AROPAJ. La confidentialité statistique des données individuelles du RICA est respectée dans la mesure où ne figurent que les codes régions, respectant en ce sens les règles d'accès aux données individuelles dans le cadre des conventions d'études avec la Commission Européenne.

Pour information, les principales entrées du modèle AROPAj sont la nature des productions animales et végétales, les prix et instruments de la Politique Agricole Commune. Les niveaux de productions fixés par culture et par exploitation-type, à partir des données RICA, sont aussi intégrés. AROPAj fournit en sortie les surfaces des principales productions, les surfaces gelées, les effectifs des animaux ainsi que la destination des productions. Il en découle les principaux résultats économiques des exploitations, les dépenses en aides directes et indirectes ainsi que certains impacts sur l'environnement. Ces sorties sont exportées sous format txt pour être ensuite intégrées dans la base de données.

La base de données comprend aussi les données régionales utiles à la reconstitution des fichiers indispensables à Stics, par exemple : caractéristiques des sol, données météorologiques journalières, type d'engrais, fractionnement par culture et par région.

Ci-dessous une vue schématique du contenu de la base de données :



II.2.2.2. L'application ArTix

Le logiciel offre une solution multi-plate-forme à l'automatisation du couplage entre AROPAj et Stics. Son architecture s'appuie sur un modèle Client/Serveur accédant à une base de données relationnelle. Les composantes de l'application font appel au langage de développement Java et à Sql, langage de manipulation de bases de données.

La couverture fonctionnelle de ArTix comprend :

- La connexion/déconnexion aux bases de données (ArTix et autres sources de données préalablement définies).
- La collecte des informations :

Des programmes spécifiques permettent la lecture des données économiques (RICA, AROPAj) présentées sous forme de fichiers txt possédant une structure fixe. Il est aussi possible de lire certains fichiers d'entrées/Sorties format Stics afin de renseigner les tables correspondantes de ArTix (param.sol, fichiers .sti).

- ~ Un programme générique est aussi disponible afin de charger directement un ensemble de données à partir d'un fichier formaté suivant la structure de la table concernée (une ligne comprend les valeurs d'un enregistrement séparées par un ;).
 - ~ A partir de l'application, l'utilisateur peut directement se connecter à une base externe afin de choisir une table dont le contenu est à charger dans celle d'ArTix choisie (données météorologiques, sols).
 - ~ Enfin, des fenêtres de mise à jour sont disponibles pour des saisies individuelles (géographiques, engrais, données techniques, ...).
 - Génération automatique de fichiers Stics régionaux : sols (Param.sol), climatiques par altitude (nomStation.AN et stat.dat), techniques (NomFichier.tec), de simulations (Travail.usm) au format attendu par le modèle Stics. Ces fichiers, créés à partir de la base pour chaque exploitation-type et variété de chaque culture simulée, ne nécessitent pas un reformatage via WinStics.
 - Simulations Stics avec choix du pays ou région ou exploitation, des cultures (le choix de la culture suffit à lancer la simulation de toutes ses variétés prédéfinies), de la culture servant de précédent, d'un intervalle de valeur pour la quantité d'azote (sous forme organique et/ou minéral). Automatiquement, les fichiers nécessaires à Stics sont générés dans le répertoire adéquat, pour chaque exploitation-type, chaque sol, chaque variété et chaque quantité d'azote, puis le modèle est appelé. Lors de simulations avec précédent cultural, le fichier recup.tmp est sauvegardé et est pris en compte pour la simulation finale.
- A la fin de chaque simulation, les fichiers de sortie sont lus et les informations utiles au projet sont enregistrées dans la base. Les fichiers sont ensuite supprimés sauf ceux présentant des erreurs de simulations ; pour ces derniers, les fichiers history sont conservés afin d'identifier le problème.
- Un premier calibrage permet de prendre en compte les simulations (entrées/sorties) et de constituer des fichiers à soumettre à AROPAj ; cette étape permet d'identifier les entrées définitives de Stics pour chaque culture et chaque exploitation-type. Ces critères servent à d'autres runs stics lancés pour les différentes sources d'azote possibles (engrais, fumier, lisier ou fientes).

On présente ci-après la fenêtre de simulations STICS via Artix.

Enchaînement de simulations Stics5

Sources climatiques : Fichier 1 1996 ... Fichier 2 1997 ...

Typologie : 1997

Altitude : 1 - recette Plaine

Médiane Moyenne

Pays : Tous

Groupe-Type : Tous

Région : Tous

Cultures d'intérêt

Autres cereales - ca
Autres cultures industrielles - ci
Autres plantes fourrageres - af
Autres raisins - ar
Avoine - av
Betterave "A" - ba
Betterave "B" - bb

Période de simulation

Début : 223 Fin : 730 Culture sur 2 années

Précédent cultural : Aucun

Période de simulation

Début : 1 Fin : 587

Sources climatiques : Culture sur 2 années

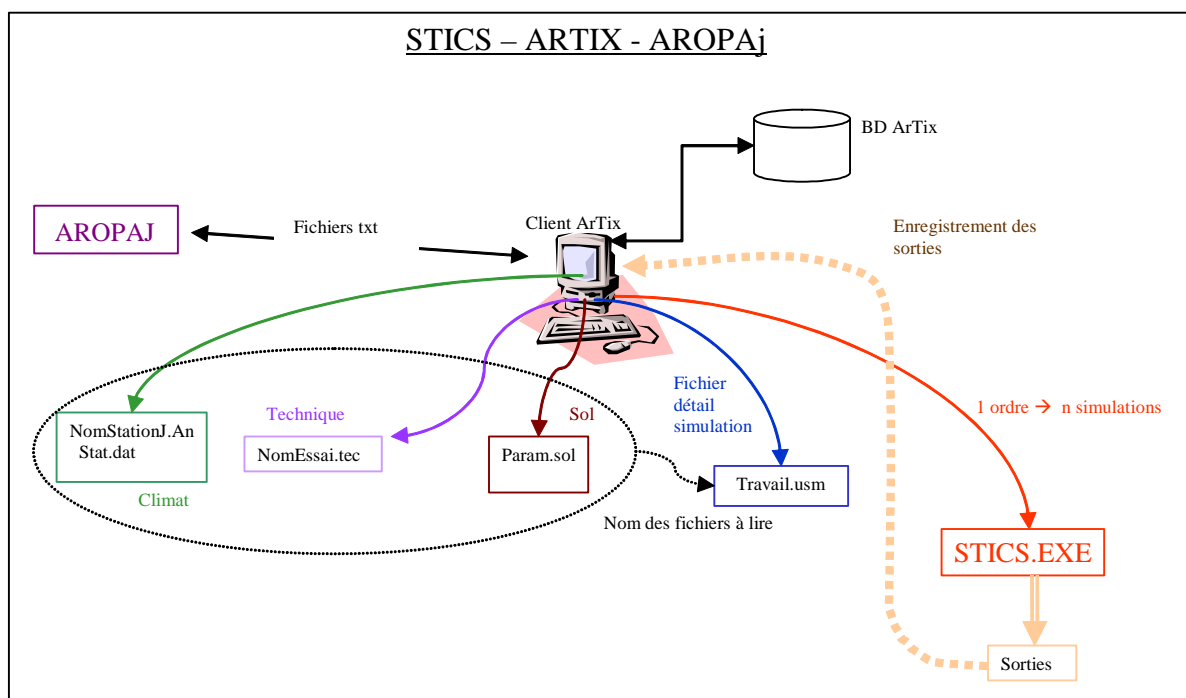
Fichier 1 1995 ... Fichier 2 1996 ...

| Engrais | | | Déjections | | |
|-----------|-----------|-----|------------|-----------|-----|
| Qtite Min | Qtite max | Pas | Qtite Min | Qtite max | Pas |
| 0 | 600 | 20 | 0 | 0 | 0 |

- Consultation des données présentes et export de données sous forme de fichiers facilement manipulables par d'autres utilisations (vers outils statistiques ou autres logiciels), avec choix du séparateur. Les fichiers Stics (Param.sol, *.tec, *.j.AN, *.usm) peuvent aussi être générés.

ArTix fonctionne aussi bien sous Unix que Windows, et son architecture est prévue pour s'intégrer dans un réseau de données ou pour une utilisation en local.

Ci-dessous un schéma récapitulatif des échanges entre Stics, ArTix et AROPaj :



II.2.3 Travaux concernant les données pédologiques nécessaires au programme

Christine Le Bas (Unité INFOSOL, INRA Orléans) travaille plus particulièrement sur les règles de pédotransfert et les méthodes pour définir les variables d'entrée « STICS » propres aux sols. En s'appuyant sur la base de données géographique des sols d'Europe au millionième, les entrées du modèle agronomique sont dérivées, et ce, à l'échelle des régions RICA (Relevé d'Information Comptable Agricole), puisque les fermes types ne sont pas localisables au sein de ces régions.

Les zones non cultivées (roche nue affleurante, zones urbaines, forêts, ...) et non traitées par le modèle économique (vignes et arbres fruitiers) ont été exclues de l'analyse en utilisant la couverture européenne Corine Land cover.

Un travail plus particulièrement important a été effectué concernant la teneur en carbone et en azote organique des sols européens à l'échelle des régions RICA, et ce, pour une couverture du sol de type « grandes cultures » (les prairies ont été exclues). Les données initiales servant à ces calculs ont été possibles grâce à une collaboration avec le Centre Commun de Recherche d'Ispra qui a fourni une estimation de la teneur en carbone organique des sols d'Europe.

Les variables nécessaires et les méthodes utilisées sont résumées succinctement dans le tableau ci-après.



Institut National de la
Recherche Agronomique

**UMR Economie Publique INRA-INAPG
(UMR INRA 210)
BP1, 78850 Grignon
France**



Institut national
agronomique
Paris-Grignon

Méthodes pour renseigner les variables d'entrée « sol » de STICS

| Nom de la variable | Signification | Affectation | |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| | | Règle de Pédotransfert ou information issue de la base sols | fixe |
| numsol | N° du sol | Numérotation à faire | |
| Typsol | type de sol | Issu directement de la base sols | |
| Argi | teneur en argile (après décarbonatation) de la couche de surface | estimation par règle de pédotransfert | |
| Norg | teneur en azote organique de la couche labourée (supposée constante sur la profondeur profhum) | Donnée dérivée de calculs de teneur en carbone organique des sols par unité cartographique de sol (UCS) | |
| Profhum | profondeur maximale du sol sur laquelle se produit la minéralisation d'azote (max.60 cm) | Fixée | 30 cm |
| calc | teneur en CaCO ₃ de la couche de surface | estimation par règle de pédotransfert | |
| pH | pH du mélange sol + amendement organique | Règle de pédotransfert établie par Christine Le Bas (3 classes prévues) | |
| concseuil | seuil minimal de concentration du sol en azote nitrique pour activation du lessivage | Quantité de nitrate soustraite au lessivage : ici toujours constante | 0 |
| albedo | albédo du sol nu sec | Sols « normaux » = 0.25, sols « clairs » = 0.3, sols « sombres » = 0.20 (D'après notice STICS) estimation par règle de pédotransfert | |

| | | | |
|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Q0 | paramètre d'évaporation en sol nu (fin de phase I) | 1 classe supplémentaire par rapport à la bibliographie de la notice STICS : 0 < [% argile] ≤ 5 ou 45 < [% argile] ≤ 50 : Q0 = 6 5 < [% argile] ≤ 25 ou 35 < [% argile] ≤ 45 : Q0 = 9 25 < [% argile] ≤ 35 : Q0 = 12 estimation par règle de pédotransfert | |
| ruisolnu | fraction de la pluie ruisselée (par rapport à la pluie totale) en conditions de sol nu | Constante = 0 car les parcelles ne sont pas considérées en pente | 0 |
| obstarac | profondeur de sol à laquelle apparaît un obstacle infranchissable à l'enracinement | C'est la profondeur sol issue de la base sols, sauf si la BD donne en plus une information « obstacle aux racines », on considère alors que l'horizon entre la profondeur d'obstacle aux racines et la profondeur du sol a une densité apparente de 1,8 | |
| codecailloux | option prise en compte des cailloux dans le bilan hydrique: oui (1), non (0) | Règle de pédotransfert mise au point par Christine Le Bas | |
| codemacropor | option de simulation de la circulation d'eau dans la macroporosité des sols pour estimer l'excès d'eau et ruissellement par "débordement": oui (1), non (0) | Selon information disponible dans la base de données sols | 0 ou 1 |
| codNH4 | option de création d'un compartiment ammoniacal dans l'azote minéral du sol: oui (1), non (0) | | 0 |
| codevolat | option d'activation du module de volatilisation de l'ammoniac: oui (1), non (0) | | 0 |
| codefente | option création d'un compartiment supplémentaire dans le bilan hydrique pour les sols argileux gonflants: oui (1), non (0) | Si Vertisol, codefente = 1, sinon, codefente = 0 | |
| coderemontcap | code d'activation des remontées capillaires | | 0 |
| codenitrif | option d'activation du calcul de la nitrification | | 0 |
| capiljour | remontées capillaires journalières | | 0 |
| humcapil | humidité minimale pour activation des remontées capillaires | | 0 |
| profimper | profondeur de l'imperméable | Donnée de la base sols (+/- disponible) | |

| | | | |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| ecartdrain | écartement entre drains | Si l'information drainage est disponible dans la base de données sols, codedrainage = 1, pour ces 3 paramètres, les valeurs sont établies à partir de données moyennes du CEMAGREF | |
| ksol | conductivité hydraulique à saturation pour le transport de l'eau vers les drains | | |
| profdrain | profondeur des drains | | |

| Par horizon | | | |
|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| epc | épaisseur de chaque horizon de sol | estimation par règle de pédotransfert | |
| Hcc | humidité à la capacité au champ (terre fine) | estimation par règle de pédotransfert | |
| hmin | humidité au point de flétrissement permanent (terre fine) | estimation par règle de pédotransfert | |
| daf | densité apparente | estimation par règle de pédotransfert | |
| cailloux | teneur volumique en cailloux | estimation par règle de pédotransfert | 0 |
| typecailloux | type de cailloux : 1=calcaires B1, 2=calcaires B2, 3=calcaires L, 4=caillasses L, 5=graviers m, 6=silex, 7=granits a, 8=calcaires J, 9=autre1, 10=autre2 | Indices surtout pour la propension à rétention d'eau de ces cailloux ou non . estimation par règle de pédotransfert | 1 |
| infil | infiltrabilité à la base de l'horizon | Si codemacropor = 1 et la profondeur de l'imperméable connue (issue de la base de données sols), alors le dernier horizon repose sur l'imperméable son « infil » = 0, sinon infil = 50 | 50 ou 0 |
| epd | épaisseur de mélange de l'azote (2*dispersivité) | | 10 |

II.2.4 Impacts du changement climatique sur les courbes de réponse

Le second objectif du programme de recherche porte sur l'impact du changement climatique sur les courbes de réponse. En ce sens, il constitue l'un des éléments d'un programme plus ambitieux, qui traite des rétroactions de l'environnement sur l'agriculture. Ce programme constitue l'objet d'une thèse développée dans l'UMR par Elodie Debove, et qui devrait s'appuyer sur un programme portant sur le couplage entre le modèle AROPAj et le modèle ORCHIDEE portant sur les rétroactions du couvert végétal sur le climat.

L'étape préalable de ce couplage suppose que l'on connaisse la déformation potentielle des courbes de réponse aux apports azotés dans des conditions de changement climatique. Cette étude est actuellement menée par Edouard Baranger (dans le cadre d'un stage de deuxième année de master professionnel cofinancé par l'INRA et l'ADEME) et Caroline Godard (dans le cadre de sa thèse).

La modification des courbes de réponse sous l'effet des modifications du climat est imputable à divers paramètres climatiques mais aussi économiques qu'il est difficile de dissocier. Nous avons donc fait le choix de travailler dans les conditions prévues par les scénarios du GIEC (ou IPCC), plus précisément, nous avons sélectionné le scénario B2. Il correspond à un développement économique et un changement climatique modéré, et peut donc être considéré comme « moyen ». L'évolution des techniques et les adaptations potentielles des pratiques culturales, des structures agricoles de production sont elles aussi conjointe au changement climatique. Ne pouvant cependant pas les appréhender de manière satisfaisante, nous avons mené notre étude « toutes conditions égales par ailleurs ». C'est-à-dire que les pratiques culturales, les structures des exploitations et leur nombre, pour ne citer que ces paramètres, restent identiques à leurs valeurs actuelles. Nous avons pour l'instant limité notre étude à la France, car cela nous permet d'avoir un accès rapide à des données météorologiques « futures » homogènes pour l'ensemble du territoire de l'étude. Le modèle ARPEGE-Climat de Météo France nous fournit ainsi des valeurs pour les principales grandeurs météorologiques selon un maillage régulier de 50 km sur 50 km pour l'ensemble du territoire métropolitain. Compte tenu de la résolution proche de ces données et de celles utilisées jusqu'alors pour construire les courbes de réponse, nous avons décidé d'utiliser directement les valeurs données par le modèle météo « futur » dans nos simulations.

Les étapes plus précises de la méthodologie sont mises en places et s'organisent ainsi :

- S'assurer de la fiabilité du modèle climatique utilisé en comparant des séries climatiques simulées pour le passé à des enregistrements réels de stations météorologiques répartis le plus uniformément possible en France. En effet, d'après les études similaires menées avec ce type de modèle, on

s'attend à observer des biais entre valeurs observées passées et valeurs simulées passées. Ceci étant particulièrement vrai pour la pluviométrie.

- Corriger les biais du modèle climatique d'après ces séries passées, et répercuter les corrections sur les séries futures, selon la zone d'influence géographique de chacune des stations météorologiques « références » d'où proviennent les enregistrements du passé.
- Attribuer un « climat moyen futur » à chacune des exploitations types du modèle AROPAj (de la même manière que l'on avait attribué un climat pour l'année 1997).
- Utiliser la base de données et l'application Artix pour lancer les simulations STICS nécessaires à la construction des courbes de réponse aux apports azotés, puis réutiliser le même ajustement statistique que lors de la construction de la courbe de réponse sous climat « actuel ». Nous prévoyons d'avoir une famille de courbes (trente exactement correspondant aux trente années de la série climatique future).
- Analyser les tendances des déformations potentielles des courbes de réponse à l'azote en conditions climatiques futures.

Actuellement, Les deux premières étapes ont été effectuées : les données météorologiques futures ont été corrigées sur la base de comparaison à des séries passées. Nous avons effectivement dû prendre en compte un biais systématique (différent selon la localisation de la station météo de référence) du modèle climatique. La troisième étape d'affectation d'un climat futur aux groupes types du modèle est en cours de réalisation.

II.3. Conclusion et perspectives

L'élaboration de fonctions de réponse à l'aide du modèle STICS, associant pour chaque culture et pour chaque exploitation type du modèle AROPAj, le rendement et l'apport en azote, est maintenant possible grâce aux données micro-économiques, physiques et techniques dont nous disposons. Il a fallu pour cela :

- Développer une méthodologie particulière d'élaboration de paramètres pour le modèle STICS, méthodologie que l'on considère comme validée par les premières simulations réalisées, et qui est en cours d'exploitation à plus grande échelle (dans un premier temps, sur toutes les cultures et pour tous les groupes types d'exploitations agricoles, représentés dans le modèle AROPAj, dans quelques Régions « test », dans un deuxième temps pour la France entière, puis enfin pour l'UE-15)
- Concevoir et alimenter une base de données rassemblant des informations micro-économiques, pédo-climatiques et techniques nécessaires à l'interfaçage des modèles STICS et AROPAj, et susceptible d'être utilisée pour d'autres programmes de recherche (programmes européens GENEDEC et INSEA en cours), et d'autres problèmes de couplage (analyse des possibilités de couplage STICS-ORCHIDEE prévu en 2005-2006, dans le cadre d'un programme GICC « test »).
- Modifier le modèle économique AROPAj, en particulier avec la mise en place d'un module dédié à l'azote qui intègre le recyclage des apports d'azote organique d'origine animale, et avec la mise en œuvre d'une méthode de calcul en deux étapes pour la résolution numérique d'un problème qui ne relève plus stricto sensu de la programmation linéaire.
- Sur ce dernier point, le modèle AROPAj a été modifié de façon à intégrer à moindre coût (en matière de temps de calcul, aussi bien qu'en matière de modification du modèle existant) les fonctions de réponse. L'optimisation, formellement non linéaire, est opérationnelle, et le modèle a fait l'objet de premières utilisations pour mesurer l'impact sur les résultats, de l'introduction de fonctions de réponse techniquement réalistes et validées du point de vue agronomique.

Le travail dans le cadre de ce projet est fortement dépendant du volet « bases de données » et la dimension pluri-disciplinaire est un défi habituellement peu compatible avec les logiques académiques fortes qui prévalent dans nos milieux de la recherche. Il a fallu également tenir compte de difficultés administratives, notamment pour l'embauche de personnes compétentes venant d'autres pays que ceux de l'Union Européenne. Ces difficultés ont pesé de façon significative sur

l'avancement des travaux. L'autre défi sera de maintenir de façon opérationnelle les compétences maintenant acquises.

La réalisation du programme a été rendue possible par le travail de thèse de Caroline Godard, co-financée par l'ADEME et l'INRA. Une thèse est en cours pour prendre le relais en ce qui concerne les impacts à plus long terme du changement climatique sur l'agriculture européenne. Au-delà des modifications des rendements et des assolements directement imputables à ce changement (analysé avec les outils existants, et toutes choses égales par ailleurs), il s'agira aussi d'utiliser STICS pour élaborer des références sur des cultures délocalisées.

II.4. Valorisation

Le programme a notamment été rendu possible par le travail réalisé dans le cadre de la thèse de Caroline Godard cofinancée par l'ADEME et l'INRA. Une communication au huitième congrès de l'ESA (European Society for Agronomy, Copenhague) a été faite dans ce cadre en 2004.

En 2005, une communication à un séminaire de l'EAAE à Parme a produit l'exploitation des premiers résultats. Ce travail utilise et complète les programmes européens GENEDEC et INSEA. Le premier porte sur les impacts du « découplage » des aides à l'agriculture dans le cadre de la réforme de la PAC. Le second porte sur les évaluations du stockage du carbone et des émissions de gaz à effet de serre d'origine agricole, et sur les impacts attendus de méthode de réduction des émissions nettes.

La communication de Parme est principalement réalisée dans le cadre du programme GENEDEC. L'exploitation des résultats a porté sur la modification de la courbe d'offre de réduction des émissions de GES due à l'introduction dans le modèle AROPAj de quelques courbes de réponse issues de la procédure développée et présentée ci-dessus.

Le Séminaire STICS des 17-18 mars 2005 a été l'occasion, avec 3 présentations, de faire état des contributions significatives du programme GICC à nos travaux de couplage de modèles.

Enfin, des discussions critiques ont été produites sur ces travaux, en particulier dans le cadre du comité de thèse de Caroline Godard, et des présentations sollicitée par l'ADEME, co-financeur de la thèse. L'un des points nouveaux particulièrement discutés a porté sur « le stockage du carbone lié à de nouvelles pratiques », et sur la possibilité de tester la réaction du modèle AROPAj aux taxations différenciées des engrais selon leur « type ».

Liste des documents redevables au programme GICC :

Godard C., Brisson N., Jayet P.A., Roger-Estrade J., (2004), Coupling a generic economic farm-type model and a generic crop model, congrès ESA, Copenhague, 11-15 juillet 2004.

Godard C., Bamière L., Debove E., De Cara S., Jayet P.A., Niang B., (2005)a , Interface between agriculture and the environment: integrating yield response functions in an economic model of EU agriculture, Seminar EAAE, Parma, 3-5 February 2005, 20p.

P.A. Jayet, C. Godard, E. Debove, (2005) Couplage de STICS avec AROPAj : un modèle d'interfaçage par le biais de courbes de réponses, Séminaire STICS, Cary Le Rouet, 17-18 mars 2005

Godard C, Brisson N, Roger-Estrade J., Jayet P.A., (2005)b, Comment renseigner les itinéraires techniques à l'échelle des régions européennes ? Séminaire STICS, Cary Le Rouet, 17-18 mars 2005

Niang B., Godard C., Jayet P-A., (2005), ArTix : base de données et solution logicielle autour du couplage de Stics et du modèle économique AROPAj. Séminaire STICS, Cary Le Rouet, 17-18 mars 2005

Thèse de Caroline Godard : soutenance prévue à l'automne 2005.

ANNEXE A : Définition de l'attribution des entrées de STICS

★ Climat

L'interpolation spatiale est déjà réalisée sur les cellules (50×50km) de la base de données dont nous disposons. Pour utiliser l'information « altitude » qui joue sur le climat surtout par l'intermédiaire de la température, nous avons attribué à chaque cellule la médiane de l'altitude (à partir d'un MNT). Après avoir classé ces altitudes selon les mêmes définitions de classe que pour les groupes types (classe 1 : de 0 à 300 m, classe 2 : de 300 à 600 m, classe 3 : plus de 600 m), nous avons calculé les valeurs moyennes des variables climatiques d'intérêt pour chaque cellule de la même classe altitudinale au sein d'une région. Nous obtenons ainsi 3 « climats » (1 par classe d'altitude) par région. Même si nous avons pensé dans un premier temps utiliser un masque Corine Land Cover et altitudinal (i.e. ôter des régions les surfaces non cultivées, ou sur lesquelles nos cultures d'intérêt ne se trouvent pas, par exemple : altitude trop élevée, viticulture...), cela ne semble pas forcément judicieux, étant donné que l'on utilise des données météo déjà interpolées et « unifiées » sur les surfaces de 50×50km que sont les cellules de la grille référence. Finalement, sont attribuées à chaque groupe type, les variables météo moyennes de la classe d'altitude correspondante.

Les variables climatiques sont donc des entrées « forcées » et non pas à ajuster.

★ Sols

Pour l'instant, nous avons utilisé pour les tests des paramètres pédologiques définis avec la méthode utilisée dans le projet ISOP (Ruget et al., ISOP Informations et Suivi Objectif des Prairies - Guide d'utilisation . Agreste Chiffres et données Agriculture, N° 134 mars 2001). Devant la difficulté de localisation des sols et des exploitations types au sein des régions (en particulier à cause de la structure même de la base de données « sols » utilisée, et de la définition des exploitations d'intérêt), les paramètres du sol feront partie des entrées « ajustées » de STICS.

Nous avons décidé de conserver 5 sols par régions, qui sont les cinq premiers majoritaires en surface d'une région. Pour l'instant, il s'agit de la surface totale de la région, à terme, nous ne considérerons que la surface régionale susceptible d'être occupée par les cultures qui nous intéressent (utilisation d'un masque sous SIG (Système d'Information Géographique). pour ne pas considérer les surfaces boisées, les cultures permanentes arboricoles ou viticoles qui ne sont pas prises en compte dans le modèle économique, lieux où la roche nue affleure, etc...).

★ Itinéraire technique

- date de semis

Nous conserverons une date moyenne de semis par région et pour les cultures pour lesquelles le groupe de précocité est prépondérant pour caler le cycle dans l'année climatique. Pour les cultures où la précocité est moins déterminante (colza, betterave), il semblerait plus judicieux de prendre en compte 3 dates de semis (minimum, maximum et moyenne par rapport aux données des instituts techniques ou de la littérature).

- variétés/ groupes de précocité

NB : La définition des variétés est limitée à leur groupe de précocité et pour chaque groupe, une variété type est définie.

Nous conservons 3 groupes de précocité au maximum pour les cultures pour lesquelles cette notion est significative (cf. § date de semis).

Cas particulier de l'orge : la dénomination « orges » regroupe dans le modèle économique tous les types d'orge (printemps/hiver, brassicole/fourrager, 2 rangs/6 rangs). Nous décidons dans un premier temps de ne conserver qu'un seul type de culture d'orge par groupe type, et ce, de la manière suivante :

pour les groupes types éleveurs : escourgeon fourrager,

pour les groupes types cultivateurs : orge de printemps brassicole.

Il est nécessaire de vérifier si ces hypothèses ne sont pas trop grossières ni incohérentes en confrontant les surfaces et des répartitions entre orge fourrager/brassicole et hiver/ printemps avec les données disponibles par ailleurs (instituts techniques, enquêtes pratiques culturelles par exemple).

- Irrigation

Pour déterminer si la culture considérée est irriguée ou non, nous utilisons l'estimation de la SAU irriguée par groupe type, qui est répartie de proche en proche selon les surfaces des cultures plus ou moins prioritaires vis-à-vis de l'irrigation.

De plus, d'après discussion, et sur dire d'experts, il semble qu'il est préférable de considérer que l'irrigation est conduite de manière à satisfaire entièrement les besoins en eau de la plante : il n'y a pas d'irrigation de complément.

D'où la proposition de détermination de l'irrigation pour une culture selon la règle suivante :

Hierarchie des cultures vis-à-vis de l'irrigation au sein d'une exploitation

| Ordre priorité | Hierarchie décroissante pour les cultures à irriguer |
|----------------|----------------------------------------------------------|
| 1 | Riz |
| 2 | Cultures sous serre |
| 3 | Soja |
| 4 | Légumes frais de plein champ |
| 5 | Légumes autres que légumes frais de plein champ + fleurs |
| 6 | Fruits |
| 7 | <i>Pomme de terre</i> |
| 8 | <i>Betterave sucrière</i> |
| 9 | <i>Maïs grain</i> |
| 10 | <i>Maïs ensilage</i> |
| 11 | <i>Tournesol</i> |
| 12 | <i>Colza</i> |
| 13 | Légumineuses fourragères |
| 14 | <i>Orges</i> |
| 15 | <i>Blé dur</i> |
| 16 | <i>Blé</i> |
| 17 | Autres céréales |
| 18 | Seigle |
| 19 | Avoine |
| 20 | Betteraves fourragères |
| 21 | Autres plantes fourragères |
| 22 | Olives |
| 23 | Autres cultures industrielles |
| 24 | Protéagineux autres que fourragers |
| 25 | Prairies temporaires |
| 26 | Prairies permanentes |
| 27 | Jachères |
| 28 | Vin de qualité |
| 29 | Vin de table et autres |
| 30 | Autres raisins |

| LEGENDE |
|----------------------------------------------------------|
| <i>En GRAS Italique 14</i> cultures modélisées |
| Cultures à irriguer prioritairement |
| Céréales peu ou pas irriguées |
| Cultures à irriguer priorité 2 |
| Oléagineux et autres cultures priorité 3 |
| Autres cultures pas irriguées |
| prairies |
| vignes |
| Jachères |

① Répartition de la SAU irriguée selon la hiérarchie des cultures (Cf. page précédente)

② Pour la dernière des cultures irriguées (i.e. irriguée partiellement), décider de son irrigation ou non :

a. si la surface irriguée est supérieure à 60 %, on considère que l'ensemble de la surface cultivée est irriguée,

b sinon : simuler les résultats obtenus en sec et en irrigué : l'option « irrigué » ou « sec » fait alors partie des entrées non fixées a priori et à déterminer dans la phase de « calibrage » des entrées de STICS.

La hiérarchie des cultures sera peut-être à revoir dans le cas de pays voisins, et la dernière « culture prioritaire » également.

Dans le modèle, on utilise l'option de gestion automatique des irrigations. Dans tous les cas, on considère que si la culture est irriguée, alors 100% de ses besoins en eau sont satisfaits : le ratiol^2 est de 1. La quantité d'eau apportée à chaque tour d'eau (paramètre dosimx de STICS) est de 40 mm.

L'irrigation est donc forcée, sauf pour certaines cultures pour lesquelles elle est une entrée à déterminer au même titre que le précédent, la variété, et le type de sol.

- Précédent cultural

Ce paramètre est important pour pouvoir initialiser l'état du sol avant la culture d'intérêt. STICS va simuler le cycle cultural du précédent et ainsi fournir les caractéristiques des résidus culturaux et de l'état du sol initiaux. Comme il semble assez difficile d'obtenir des informations complètes sur le précédent pour tous les groupes types et toutes les cultures, nous avons considéré le précédent comme une variable d'entrée « ajustée » de STICS. Nous avons limité le choix du précédent à « légumineuse » ou « non légumineuse », et considéré alors pour un précédent non légumineuse un blé d'hiver, et pour un précédent légumineuse, un pois de printemps.

Pour chaque culture, il s'agit d'établir une règle pour fractionner la dose totale apportée (donnée issue de l'informations « charge en engrais ») et la répartir en doses « plausibles » pour chaque apport. Il est également nécessaire de vérifier dans la littérature à partir de quelle dose on considère que le rendement maximal de la culture est atteint.

² ratiol = Paramètres de STICS correspondant à l'état hydrique de la plante en deçà duquel un apport d'eau est automatiquement déclenché (module de gestion automatique de l'irrigation de STICS).

- calendrier des apports d'azote

D'autre part, il semble plus facile de repérer les dates d'apports par les stades physiologiques des plantes : un « aménagement » de STICS a été fait pour pouvoir stipuler les dates de fertilisation directement en unités de développement et non pas en jours juliens comme c'est le cas dans la version standard du modèle.

Contrairement à ce qui avait d'abord été envisagé, les doses apportées à chaque stade fondamental pour la fertilisation azotée pour chaque culture seront donc imposées en entrée, et ce en fonction de la culture et de la quantité totale d'azote apporté en cours de culture qui est définie à partir des charges totales en engrais (cf. 2.1).

- apports d'azote organiques

Trois types d'apports organiques sont distingués, en fonction de leur teneur en azote et de leur rapport C/N: fumier, lisier et fientes de volailles. Dans un premier temps, les normes du CORPEN (Comité d'Orientation pour des Pratiques agricoles respectueuses de l'Environnement) sont utilisées pour fixer les caractéristiques de ces déjections animales.

Les sorties d'AROPAj doivent permettre à terme de définir les quantités de chaque catégorie de déjections produites pour chaque groupe type. Nous sommes en train de chercher à définir des règles précises pour l'épandage (dates et quantités) sur chaque culture au sein d'une exploitation type. Nous travaillons actuellement avec Laure Bamière qui a pris en charge la mise au point du module de calcul des déjections animales dans le modèle économique sur ces questions. Dans tous les cas, nous envisageons bien de forcer également cette entrée « apports organiques » dans STICS.

L'Auvergne nous servira particulièrement de région test adaptée à ces questions.

Finalement, nous disposons des variables d'ajustement possibles suivantes (pour une situation donnée, c'est-à-dire une culture et un groupe type et une dose d'azote totale définie par les charges en engrais azoté) :

- * Climats : 1
- * Sols : 5
- * Date de semis : 1 (ou 3 si pas de sensibilité précocité)
- * Variétés : 3 (ou 1 seule si pas sensibilité à la précocité)
- * Précédents : 2

$$\Rightarrow 1 \times 5 \times 1 \times 3 \times 2 = 30 \text{ simulations}$$

Toutes les autres entrées sont considérées comme forcées.

Annexe B . Données sur les déjections animales et hypothèses pour leur prise en compte

| Activités du modèle économique | catégorie de "producteur" de déjection correspondante |
|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| va' veau 8j batterie acheté | veau allaitant |
| ve' veau 8j batterie issu de l'exploitation | veau allaitant |
| vg' veau boucherie 2 mois | veau allaitant |
| vm' veau "maigre 6-8 mois" | veau allaitant |
| vt' veau destiné taurillon | veau allaitant |
| vb' veau destiné boeuf | veau allaitant |
| nl' veau femelle "lait" non reporté | veau lait |
| nv' veau femelle "viande" non reporté | veau allaitant |
| fr' veau femelle reporté | veau lait |
| jt' veau acheté destiné taurillon | veau allaitant |
| jb' veau acheté destiné boeuf | veau allaitant |
| jl' veau femelle acheté "lait" | veau lait |
| jv' veau femelle acheté "viande" | veau allaitant |
| te' taurillon issu exploitation | taurillon 2.5 ans |
| ta' taurillon acheté | taurillon 2.5 ans |
| me' mâle 1 an issu exploitation destiné boeuf | mâle 1 an allaitant |
| ma' mâle 1 an acheté destiné boeuf | mâle 1 an allaitant |
| fl' femelle 1 an issue exploitation "lait" | génisse 1an lait |
| fv' femelle 1 an issue exploitation "viande" | génisse 1an allaitant |
| hl' femelle 1 an achetée "lait" | génisse 1an lait |
| hv' femelle 1 an achetée "viande" | génisse 1an allaitant |
| be' boeuf issu exploitation | VA |
| ba' boeuf acheté | VA |
| rl' génisse "lait" | génisse 3 ans lait |
| rv' génisse "viande" | génisse 3 ans allaitante |
| vl' vache laitière | VL |
| vv' vache "viande" | VA |
| veau vendu taurillon | veau allaitant |
| veau vendu boeuf | veau allaitant |
| veau femelle vendu "lait" | veau lait |
| veau femelle vendu "viande" | veau allaitant |
| mâle 1 an vendu destination boeuf | mâle 1 an allaitant |
| femelle 1 an vendue destination "lait" | génisse 1an lait |
| femelle 1 an vendue destination "viande" | génisse 1an allaitant |
| ov' ovins | ovins |
| cp' caprins | caprin |
| po' porcs | porc |
| vo' volailles | volaille |

L'apport d'azote sous forme de déjections animales dans le modèle agronomique doit être relié au module zootechnique du modèle économique. Nous avons donc basé les données « type » des différents types de déjections animales sur les catégories fixées par le modèle économique. Ainsi, nous avons créé des catégories pour les quantités produites par animal et par an d'une part, et pour les compositions d'autre part. Sur la base de ces compositions, nous avons déterminé les paramètres nécessaires à la définition des déjections en entrée de STICS (cf. tableau page précédente).

Les dates d'apport des différents engrais de ferme ont été fixés de manière générale : les lisiers sont apportés au printemps, les fumiers à l'automne ou en fin d'été, les déjections de volailles étant traitées à part (voir tableaux ci-dessous).

ordre de priorité pour l'épandage

| Culture réceptrice | lisiers bovins, porcins | fumiers bovins, porcins, ovins, caprins | lisiers et fientes volailles |
|--------------------------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------------|------------------------------|
| blé et autres céréales d'hiver | 1 | 3 | 1 |
| maïs grain et ensilage et autres cultures de printemps | 2 | 1 | 2 |
| colza d'hiver | 3 | 2 | 3 |
| prairies temporaires | 4 | 4 | JAMAIS |
| prairies permanentes | 4 | 4 | JAMAIS |

dates d'apport

| Culture réceptrice | lisiers bovins, porcins | fumiers bovins, porcins, ovins, caprins | lisiers et fientes volailles |
|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------|
| blé et autres céréales d'hiver | printemps avant épi 1cm | Automne avant labour | printemps avant épi 1cm |
| maïs grain et ensilage et autres cultures de printemps | au labour (env. 10-15 J avant le semis) | le plus tôt possible fin d'été (juil-août) | au labour (env. 10-15 j avant le semis) |
| colza d'hiver | avant semis (qq j) | Automne au labour | avant semis (qq j) |
| prairies temporaires | n'importe quand | n'importe quand | JAMAIS |
| prairies permanentes | n'importe quand | n'importe quand | JAMAIS |