



HAL
open science

Evolution des bases de données pour caractériser les dynamiques des systèmes de culture sur le bassin Seine-Normandie

Thomas Puech, Céline Schott, Catherine Mignolet

► **To cite this version:**

Thomas Puech, Céline Schott, Catherine Mignolet. Evolution des bases de données pour caractériser les dynamiques des systèmes de culture sur le bassin Seine-Normandie. [Contrat] Agence de l'Eau Seine Normandie. 2018, 228 p. hal-01953363

HAL Id: hal-01953363

<https://hal.science/hal-01953363v1>

Submitted on 12 Dec 2018

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

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

Modélisation des pollutions diffuses d'origine agricole sur le bassin Seine-Normandie

Volume 1/7

Evolution des bases de données pour caractériser les dynamiques des systèmes de culture sur le bassin Seine-Normandie

T. PUECH, C. SCHOTT, C. MIGNOLET

thomas.puech@inra.fr, celine.schott@inra.fr, catherine.mignolet@inra.fr

Octobre 2018

INRA-SAD ASTER

662, avenue Louis Buffet, 88 500 MIRECOURT

Modélisation des pollutions diffuses d'origine agricole sur le bassin Seine-Normandie

Volume 1/7

Evolution des bases de données pour caractériser les dynamiques des systèmes de culture sur le bassin Seine-Normandie

T. PUECH, C. SCHOTT, C. MIGNOLET

thomas.puech@inra.fr, celine.schott@inra.fr, catherine.mignolet@inra.fr

Octobre 2018

INRA-SAD ASTER

662, avenue Louis Buffet, 88 500 MIRECOURT

Référence INRA : RPC n° 12 000 431
N° de convention d'aide AESN : 1 059 507 (1) 2015

PREAMBULE

Cet ouvrage est le premier opus d'un ensemble de sept documents faisant état des travaux effectués entre 2016 et 2018 et plus particulièrement orientés vers la modélisation des pollutions diffuses d'origine agricole sur le bassin Seine-Normandie.

Ces travaux ont été menés conjointement par des équipes de recherches de l'INRA SAD-Aster de Mirecourt, de l'INRA Agroimpact de Laon, de l'INRA Infosol d'Orléans et de MINES ParisTech (centre de Géosciences).

Ces sept ouvrages sont les suivants :

1. Evolution des bases de données pour caractériser les dynamiques des systèmes de cultures sur le bassin Seine-Normandie (INRA-SAD Aster) ;
2. Modélisation de la pollution diffuse d'origine agricole des grands aquifères du bassin Seine-Normandie – Scénarios d'évolution climatique (MINES ParisTech) ;
3. Modélisation de la pollution diffuse d'origine agricole des grands aquifères du bassin Seine-Normandie – Actualisation des modélisations couplées STICS-MODCOU – Modélisation de scénarios agricoles sous changement climatique (MINES ParisTech, INRA(s) SAD-Aster, Agroimpact et Infosol) ;
4. Modélisation de la pollution diffuse d'origine agricole des grands aquifères du bassin Seine-Normandie – Fiches synthétiques par masse d'eau souterraine des principaux résultats de modélisation couplées « Hydrogéologie-Agriculture » (MINES ParisTech);
5. Modélisation mathématique du comportement hydrogéologique des formations tertiaires du bassin parisien (MINES ParisTech) ;
6. Evolution de l'usage des produits phytosanitaires sur le bassin Seine-Normandie (INRA DAS-Aster) ;
7. Modélisation des transferts de produits phytosanitaires vers les eaux souterraines (INRA SAD-Aster, MINES ParisTech).

Ces travaux ont été financés par l'Agence de l'Eau Seine-Normandie (conventions d'aide 1 059 506 (1) et 1 059 507 (1) 2015).

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	1
TABLE DES ILLUSTRATIONS	3
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS	8
INTRODUCTION	9
1. Evolution des activités agricoles sur le bassin Seine-Normandie : quelques rappels	11
1.1 La zone d'étude	11
1.2 Dynamiques des exploitations agricoles	12
1.3 Le maillage spatial agricole du bassin Seine-Normandie	14
1.4 La caractérisation des systèmes de culture	16
1.4.1 Caractérisation des successions de cultures	16
1.4.2 Caractérisation des itinéraires techniques	16
1.4.3 Reconstitution des systèmes de culture	17
2. Dynamiques temporelles des systèmes de culture : homogénéisation des bases de données agricoles .19	
2.1 Problématique : pourquoi homogénéiser les bases de données ?	19
2.2 Sources d'informations	22
2.3 Méthode	23
2.4 Résultats	33
2.4.1 L'exemple dans le Drouais – Thimerais (UMA 152)	33
2.4.2 Evolution des assolements des UMA du bassin Seine-Normandie	34
2.4.3 Evolution des pratiques agricoles	40
2.4.4 Synthèse : la base de données ARSEINE en quelques chiffres	45
2.5 Validation à partir de sources de données	45
2.5.1 Sources d'informations	45
2.5.2 Indicateurs de comparaison	46
2.5.3 Validité des pratiques ARSEINE	47
3. Spatialisation des successions de cultures	51
3.1 Problématique	51
3.2 Données mobilisées	52
3.3 Méthode proposée : spatialisation des occupations du sol au niveau des unités cartographiques de sol 53	
3.3.1 Partie 1 : caractérisation de l'assolement de successions de cultures des UCS	54
3.3.2 Partie 2 : Lien avec les unités typologiques de sol	57
3.3.3 Synthèse et perspectives	60
4. Actualisation de la base de données ARSEINE	61
5. Modélisation de scénarii agricoles	65
5.1 Sources d'information mobilisées	65
5.1.1 Les statistiques de caractérisation historique des territoires	66
5.1.2 Les exercices prospectifs	66
5.2 Les indicateurs d'évolution de l'agriculture sur le bassin	66
5.2.1 L'élevage sur le bassin	67

5.2.2	Evolution des systèmes de culture	67
5.3	Résultats : Evolutions possibles du climat	69
5.3.1	Evolution des températures moyennes	71
5.3.2	Evolution des sommes de températures	71
5.3.3	Evolution du nombre de jours chauds	72
5.3.4	Evolution du nombre de jours de gel	73
5.3.5	Evolution des précipitations	73
5.3.6	Evolution du bilan hydrique	74
5.4	Les impacts possibles du changement climatique sur les systèmes de culture à l'échelle du bassin Seine-Normandie	74
5.5	Scénario A : Une poursuite de la spécialisation et de l'intensification de l'agriculture du bassin Seine-Normandie (ScenA)	76
5.5.1	Quelques éléments de contexte	76
5.5.2	L'élevage sur le bassin	77
5.5.3	Evolution des systèmes de culture	80
5.6	Scénario B : Un bassin en transition écologique (ScenB)	85
5.6.1	Quelques éléments de contexte	85
5.6.2	L'élevage sur le bassin	86
5.6.3	Evolution des systèmes de culture	89
5.7	Limites du travail de prospective	93
CONCLUSION		95

TABLE DES ILLUSTRATIONS

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Evolution des quelques occupations de sol caractéristiques sur le territoire du bassin de la Seine-Normandie entre 1970 et 2010 (Sources : Recensements Agricoles).....	19
Figure 2 : assolements sur l'UMA 152 à partir des données d'ARSEINE 2.2 (2006-2014) et ARSEINE-old (1970-2006)	20
Figure 3 : assolements sur le département d'Eure-et-Loir depuis 1970	21
Figure 4 : modèle de successions « linéaire »	27
Figure 5 : modèle de successions « exponentiel »	27
Figure 6 : modèle de successions « transformation linéaire de A en B ».....	29
Figure 7 : modèle de successions « sigmoïdale ».....	30
Figure 8 : modèle de successions « normale ».....	31
Figure 9 : modèle de successions « de Dirac ».....	32
Figure 10 : Evolution des fréquences estimées des céréales sur l'UMA 152	33
Figure 11 : Evolution des fréquences estimées des principales têtes de rotation sur l'UMA 152	33
Figure 12 : Evolution des assolements en céréales reconstitués sur l'UMA 152 dans la base de données ARSEINE.....	34
Figure 13 : Evolution des assolements des principales têtes de rotation reconstitués sur l'UMA 152 dans la base de données ARSEINE.....	34
Figure 14 : Evolution des assolements des principales cultures sur le bassin Seine-Normandie (source ARSEINE)	39
Figure 15 : Evolution de la fertilisation azotée minérale moyenne des principales cultures annuelles du bassin Seine-Normandie (source ARSEINE).....	41
Figure 16 : Evolution des surfaces labourées des principales cultures annuelles du bassin Seine-Normandie (source ARSEINE).....	43
Figure 17 : Evolution des surfaces concernées par l'implantation de couverts intermédiaires avant les principales cultures de printemps du bassin Seine-Normandie (source ARSEINE)	44
Figure 18 : Assolement moyen sur l'UMA 151 et sur l'UCS 66 de l'UMA 151 entre 2007 et 2014.....	54
Figure 19 : Schéma conceptuel de spatialisation des successions de cultures par rapport aux types de sols	56
Figure 20 : Comparaison des assolements en blé tendre sur l'UMA 151 sur la période 2006-2014.	57
Figure 21 : évolution du chargement bovin (lait, viande et cheptel de renouvellement) en fonction de la surface fourragère régionale pour le ScenA	80
Figure 22 : Evolution de l'assolement du bassin Seine-Normandie dans le cadre du scénario A (1970 – 2050).	81
Figure 23 : évolution de la fertilisation minérale azotée sur blé tendre (1970 – 2050) d'après le scénario A	83
Figure 24 : évolution du chargement bovin (lait, viande et cheptel de renouvellement) en fonction de la surface fourragère régionale d'après le scénario B ²³	88
Figure 25 : Evolution de l'assolement du bassin Seine-Normandie dans le cadre du scénario B (1970 – 2050).	89
Figure 26 : évolution de la fertilisation minérale sur blé tendre (1970 – 2050) d'après le scénario B	91
Figure 27 : Modèle conceptuel de la base de données (version 3.4.3).....	100
Figure 28 : Schéma des principaux descripteurs des activités agricoles et de leurs relations.....	101
Figure 29 : Capture d'écran des tables à utiliser pour une requête sur la fertilisation (source ARSEINE).	120
Figure 30 : résultat graphique de l'évolution de la fertilisation azotée minérale sur le blé tendre dans l'UMA 11 (source ARSEINE).....	122
Figure 31 : Estimation des surfaces en céréales de l'UMA 152.	124
Figure 32 : Formulaire de travail evolution_assolement.	125
Figure 33 : Etat de l'assolement en céréales de l'UMA 152 avant actualisation de la base de données.	126

Figure 34 : Etat de l'assolement en céréales de l'UMA 152 après actualisation de la base de données. .127	127
Figure 35 : Evolution des températures moyennes décadaires dans 8 régions contrastées du bassin Seine-Normandie	194
Figure 36 : Evolution des sommes de température (base 8°C) décadaires dans 8 régions contrastées du bassin Seine-Normandie selon 2 scénarii climatiques	198
Figure 37 : Evolution des du nombre de jours chauds (T>+25°C) dans 8 régions contrastées du bassin Seine-Normandie selon 2 scénarii climatiques	200
Figure 38 : Evolution du nombre de jours de gel dans 8 régions contrastées du bassin Seine-Normandie selon 2 scénarii climatiques	201
Figure 39 : Evolution précipitations mensuelles dans 8 régions contrastées du bassin Seine-Normandie selon 2 scénarii climatiques	204
Figure 40 : Evolution du bilan hydrique décadaire dans 8 régions contrastées du bassin Seine-Normandie selon 2 scénarii climatiques	206
Figure 41 : Evolution des cultures de vente sur la Grande Région Agricole 1 dans le cadre du scénario A	207
Figure 42 : Evolution des cultures fourragères sur la Grande Région Agricole 1 dans le cadre du scénario A	207
Figure 43 : Evolution des cultures de vente sur la Grande Région Agricole 2 dans le cadre du scénario A	208
Figure 44 : Evolution des cultures fourragères sur la Grande Région Agricole 2 dans le cadre du scénario A	208
Figure 45 : Evolution des cultures de vente sur la Grande Région Agricole 3 dans le cadre du scénario A	209
Figure 46 : Evolution des cultures fourragères sur la Grande Région Agricole 3 dans le cadre du scénario A	209
Figure 47 : Evolution des cultures de vente sur la Grande Région Agricole 4 dans le cadre du scénario A	210
Figure 48 : Evolution des cultures fourragères sur la Grande Région Agricole 4 dans le cadre du scénario A	210
Figure 49 : Evolution des cultures de vente sur la Grande Région Agricole 5 dans le cadre du scénario A	211
Figure 50 : Evolution des cultures fourragères sur la Grande Région Agricole 5 dans le cadre du scénario A	211
Figure 51 : Evolution des cultures de vente sur la Grande Région Agricole 6 dans le cadre du scénario A	212
Figure 52 : Evolution des cultures fourragères sur la Grande Région Agricole 6 dans le cadre du scénario A	212
Figure 53 : Evolution des cultures de vente sur la Grande Région Agricole 7 dans le cadre du scénario A	213
Figure 54 : Evolution des cultures fourragères sur la Grande Région Agricole 7 dans le cadre du scénario A	213
Figure 55 : Evolution des cultures de vente sur la Grande Région Agricole 1 dans le cadre du scénario B	214
Figure 56 : Evolution des cultures fourragères sur la Grande Région Agricole 1 dans le cadre du scénario B	214
Figure 57 : Evolution des cultures de vente sur la Grande Région Agricole 2 dans le cadre du scénario B	215
Figure 58 : Evolution des cultures fourragères sur la Grande Région Agricole 2 dans le cadre du scénario B	215
Figure 59 : Evolution des cultures de vente sur la Grande Région Agricole 3 dans le cadre du scénario B	216

Figure 60 : Evolution des cultures fourragères sur la Grande Région Agricole 3 dans le cadre du scénario B	216
Figure 61 : Evolution des cultures de vente sur la Grande Région Agricole 4 dans le cadre du scénario B	217
Figure 62 : Evolution des cultures fourragères sur la Grande Région Agricole 4 dans le cadre du scénario B	217
Figure 63 : Evolution des cultures de vente sur la Grande Région Agricole 5 dans le cadre du scénario B	218
Figure 64 : Evolution des cultures fourragères sur la Grande Région Agricole 5 dans le cadre du scénario B	218
Figure 65 : Evolution des cultures de vente sur la Grande Région Agricole 6 dans le cadre du scénario B	219
Figure 66 : Evolution des cultures fourragères sur la Grande Région Agricole 6 dans le cadre du scénario B	219
Figure 67 : Evolution des cultures de vente sur la Grande Région Agricole 7 dans le cadre du scénario B	220
Figure 68 : Evolution des cultures fourragères sur la Grande Région Agricole 7 dans le cadre du scénario B	220

LISTE DES CARTES

Carte 1 : Localisation du bassin Seine-Normandie sur fond d'occupation du sol (Source : CLC 2006)	11
Carte 2 : Localisation et topographie du bassin Seine-Normandie	12
Carte 3 : Cartographie des orientations technico-économiques des exploitations agricoles majoritaires par commune (source RA 1970 et RA 2010, traitements INRA ASTER)	13
Carte 4 : Cartographie de l'évolution des OTEX agricoles majoritaires par commune entre 1970 et 2010 (source RA 1970 – 2010, traitements INRA ASTER)	14
Carte 5 : Définition des Unités de Modalisation Agricole sur fond de typologie des assolements communaux	15
Carte 6 : Délimitation des 7 Grandes Régions Agricoles sur fond de typologie des assolements communaux	16
Carte 7 : Evolution de la fréquence de cultures de printemps sur le Seine-Normandie entre 1970 et 2014	37
Carte 8 : Evolution de la diversité des assolements des UMA du bassin Seine-Normandie entre 1970 et 2014	37
Carte 9 : Evolution de la quantité d'azote minérale moyenne épandue sur le bassin Seine-Normandie entre 1970 et 2014	42
Carte 10 : localisation des types de sols simplifiés sur les plateaux des Barrois en Côte d'Or	51
Carte 11 : localisation des cultures majoritaires des îlots RPG 2012 et des types de sols simplifiés sur les plateaux des Barrois en Côte d'Or	52
Carte 12 : localisation des sites retenus pour la caractérisation de l'évolution du climat.	70
Carte 13 : Cartes d'évolution des effectifs de vaches laitières et vaches allaitantes pour le ScenA (1970 – 2010 et 2050).	78
Carte 14 : Cartes d'évolution des effectifs de truies et volailles pour le ScenA (1970 – 2010 et 2050).	79
Carte 15 : Evolution de l'indice de diversité des assolements entre 2010 et 2050 d'après le scénario A	82
Carte 16 : Evolution de l'indice de diversité des successions de cultures entre 2010 et 2050 d'après le scénario A	83
Carte 17 : Evolution de la fertilisation azotée minérale d'après le scénario A	84
Carte 17 : Evolution des surfaces irriguées (équivalent 100m/an) entre 2010 et 2050 d'après le scénario A	85
Carte 18 : Cartes d'évolution des effectifs de vaches laitières et vaches allaitantes pour le scénario B (1970 – 2010 et 2050).	87

Carte 19 : Cartes d'évolution des effectifs de truies et volailles pour le scénario B (1970 – 2010 et 2050).	88
Carte 20 : Evolution de l'indice de diversité des assolements entre 2010 et 2050 d'après le scénario B...	90
Carte 21 : Evolution de l'indice de diversité des successions de cultures entre 2010 et 2050 d'après le scénario B.....	90
Carte 17 : Evolution de la fertilisation azotée minérale d'après le scénario B	92
Carte 22 : Evolution des surfaces irriguées (équivalent 100m/an) entre 2010 et 2050 dans le scénario B	93

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : différences moyennes entre assolement estimé à partir des statistiques agricoles et assolement représenté par la base de données ARSEINE.....	38
Tableau 2 : Tableau de validation des bilans d'apports azotés organiques (exprimé en kg N organique / ha SAU, source ARSEINE)	45
Tableau 3 : comparaison des indicateurs issus d'ARSEINE et des enquêtes parcellaires sur 3 régions du bassin Seine-Normandie	49
Tableau 4 : hypothèses d'extrapolation de la distribution des cultures en fonction des types de sols	55
Tableau 5 : matrice de compatibilité des cultures en fonction des paramètres physiques des sols	58
Tableau 6 : Exemple de propriétés de 3 UTS de l'Eure-et-Loir	59
Tableau 7 : Exemples de note agronomique.....	60
Tableau 8 : liste des variables utilisées pour l'étude des évolutions du climat sur le bassin Seine Normandie.	69
Tableau 9 : Différence de température moyenne (°C) entre la période 1980-2000 et la période 2040-2060 selon les RCP 4.5 et 8.5.	71
Tableau 10 : Evolution des sommes de degré jour entre le 15 avril et le 25 octobre (exprimée en °C, base 6°C).....	72
Tableau 11 : Evolution du nombre de jours chauds ($T_{moy} \geq 25^{\circ}C$) entre la période 1980-2000 et 2040-2060	73
Tableau 12 : Evolution du nombre de jours de gel ($T_{min} \leq -1^{\circ}C$) entre la période 1980-2000 et 2040-2060	73
Tableau 13 : Evolution des précipitations totales annuelles (en mm) et leur évolution entre la période 1980-2000 et la période 2040-2060	74
Tableau 14 : ARSEINE : Structure de la table maille_definition.....	102
Tableau 15 : ARSEINE : Structure de la table maille_description	102
Tableau 16 : ARSEINE : Structure de la table expert_description	102
Tableau 17 : ARSEINE : Structure de la table expert_description	103
Tableau 18 : ARSEINE : Structure de la table elevage_description.....	103
Tableau 19 : ARSEINE : Structure de la table elevage_definition	103
Tableau 20 : ARSEINE : Structure de la table sol_definition	104
Tableau 21 : ARSEINE : Structure de la table sol_description.....	104
Tableau 22 : ARSEINE : Structure de la table succession_definition.....	105
Tableau 23 : ARSEINE : Structure de la table succession_transition	105
Tableau 24 : ARSEINE : caractérisation des types de transition	106
Tableau 25 : ARSEINE : Structure de la table succession_transition_temp.....	106
Tableau 26 : ARSEINE : Structure de la table succession_description	107
Tableau 27 : ARSEINE : Structure de la table culture_description	107
Tableau 28 : ARSEINE : Structure de la table culture_definition	107
Tableau 29 : ARSEINE : Structure de la table travail_sol_definition.....	108
Tableau 30 : ARSEINE : Structure de la table travail_sol_description	108
Tableau 31 : ARSEINE : Structure de la table travail_sol	109
Tableau 32 : ARSEINE : Structure de la table ferti_definition	109

<i>Tableau 33 : ARSEINE : Structure de la table ferti_description</i>	109
<i>Tableau 34 : ARSEINE : Structure de la table ferti</i>	109
<i>Tableau 35 : ARSEINE : Structure de la table interculture_definition</i>	110
<i>Tableau 36 : ARSEINE : Structure de la table interculture_description</i>	110
<i>Tableau 37 : ARSEINE : Structure de la table interculture</i>	110
<i>Tableau 38 : ARSEINE : Structure de la table irrigation_description</i>	111
<i>Tableau 39 : ARSEINE : Structure de la table irrigation</i>	111
<i>Tableau 40 : ARSEINE : Structure de la table phyto</i>	111
<i>Tableau 41 : ARSEINE : Structure de la table phyto_description</i>	112
<i>Tableau 42 : ARSEINE : Structure de la table phyto_definition_usages</i>	112
<i>Tableau 43 : ARSEINE : Structure de la table phyto_definition_molecules</i>	113
<i>Tableau 44 : ARSEINE : Structure de la table prairie_definition</i>	113
<i>Tableau 45 : ARSEINE : Structure de la table prairie_description</i>	113
<i>Tableau 46 : ARSEINE : Structure de la table prairie</i>	113
<i>Tableau 47 : ARSEINE : Structure de la table vigne_definition</i>	114
<i>Tableau 48 : ARSEINE : Structure de la table vigne_description</i>	114
<i>Tableau 49 : ARSEINE : Structure de la table vigne</i>	114
<i>Tableau 50 : ARSEINE : Structure de la table frequence_itk</i>	115
<i>Tableau 51 : ARSEINE : Structure de la table selection_exportation</i>	119
<i>Tableau 52 : ARSEINE : Structure de la table succession_transition_temp</i>	119
<i>Tableau 53 : ARSEINE : Structure de la table succession_transition_temp_UCS</i>	119

ANNEXES

Annexe 1 : Construction de la base de données	99
Annexe 2 : Cartographie de l'évolution des pratiques agricoles sur le bassin Seine-Normandie entre 1970 et 2013	128
Annexe 3 : Evolution des indicateurs climatiques sur le bassin Seine-Normandie	192
Annexe 4 : Evolution d'assolement des grandes régions agricoles	207
Annexe 5 : Bibliographie	221

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

AAC	Aire d'alimentation de captages
AESN	Agence de l'Eau Seine-Normandie
AFCM	Analyse Factorielle des Correspondances Multiples
ANR	Agence Nationale de la Recherche
ARSeiNe	Base de données Agricole Régionalisée sur le bassin SEiNe-NormandiE
CAH	Classification Ascendante Hiérarchique
CASD	Centre d'Accès Sécurisé Distant
CIPAN	Culture Intermédiaire Piège À Nitrates
CLC	Corine Land Cover
ETP	EvapoTranspiration Potentielle
GC	Grandes Cultures
GRA	Grande Région Agricole
Ha	Hectares
ITK	Itinéraire Technique
OTEX	Orientation Technico-économique des EXploitations
PIREN-Seine	Programme Interdisciplinaire de Recherche en ENvironnement sur le bassin de la Seine
PK	Pratique Culturelles
uN	Unité d'azote (= kg d'élément azote)
RA	Recensement Agricole
RPG	Registre Parcellaire Graphique
RRP	Référentiel Régional Pédologique
SAA	Statistique Agricole Annuelle
SAU	Surface Agricole Utile
SN	Seine-Normandie
SSP	Service de la Statistique et de la Prospective (ministère de l'Agriculture et de la Forêt)
UAH	Unité Agricole Homogène
UCS	Unité Cartographique de Sol
UMA	Unité de Modélisation Agricole
UTS	Unité Typologique de Sol

Abréviations des cultures

BdH	Blé dur d'Hiver
BtH	Blé tendre d'Hiver
Co	Colza
MF	Maïs Fourrage (= Maïs Ensilage)
MG	Maïs Grain
OH	Orge d'Hiver
OP	Orge de Printemps
Pdt	Pomme de terre
PoH	Pois d'Hiver
PoP	Pois de Printemps
PP	Prairies permanentes
STH	Surface Toujours en Herbe
To	Tournesol
Tri	Triticale

INTRODUCTION

Le bassin Seine-Normandie est un territoire majoritairement agricole avec près de 60% de sa superficie est occupée par des activités agricoles. Dans le même temps, près d'un français sur 3 dont la majorité habite dans l'agglomération parisienne, sont présents dans les limites du bassin. La disponibilité en eau tant en termes qualitatif que quantitatif est un enjeu majeur pour l'alimentation en eau des 19 millions d'habitants présents sur le bassin. Bien que la qualité des milieux aquatiques se soit nettement amélioré depuis la mise en place des politiques de l'eau, seules 28% des masses d'eau souterraines et 31% des masses d'eau de surface sont déclarées être en bon état chimique (AESN, 2015).

Depuis une dizaine d'années et le développement de partenariats avec le programme interdisciplinaire de recherche en environnement sur le bassin de la Seine (PIREN-Seine), l'agence de l'eau a mis en place des outils de gestion et de connaissance du fonctionnement des masses d'eau et en liens avec les activités urbaines, industrielles et agricoles. C'est à partir de cette date qu'ont commencé à émerger des outils de modélisation du fonctionnement des hydrosystèmes en lien avec les activités de surface, notamment agricoles. Dans cette optique, un outil de modélisation des transferts de contaminants nitriques d'origine agricole vers les aquifères a été développé par Armines/MinesParisTech.

Dans ce cadre l'unité INRA SAD-ASTER a été sollicitée pour caractériser les activités agricoles et leurs évolutions sur le temps long à l'échelle du bassin Seine-Normandie. Ces travaux ont débuté au début des années 2000 dans le cadre du PIREN-Seine avec la mise en place d'une base de données sur les pratiques agricoles du bassin de la Seine couvrant la période 1970-2006 (Benoit et al, 2000). Un travail similaire a été conduit en 2009 (Schott et al, 2009) sur la Basse Normandie pour compléter le premier. Au début des années 2010, un travail sur l'ensemble du bassin Seine-Normandie a été conduit (Puech et al, 2015) afin de réactualiser les travaux précédents dont la portée temporelle était trop ancienne pour caractriser les systèmes de l'époque (convention ARMINES-INRA-AESN, 2013). La juxtaposition de ces travaux permet de caractériser les activités agricoles sur l'ensemble du bassin Seine-Normandie sur le temps long (1970-2014) sous la forme de 3 bases de données distinctes. Ces trois bases de données ont des points de similitude du fait des objets qu'elles décrivent (les systèmes de culture), elles sont d'une part fondées sur des grain spatiaux différents (Petites Régions Agricoles, Cantons ou Unités de Modélisation Agricole) et d'autre part caractérisent les activités agricoles sur la base de périodes homogènes d'une dizaine d'années au cours desquelles les systèmes de culture sont invariants. De ce fait, certaines évolutions (assolements, retournement de prairies, pratiques de fertilisation...) sont représentées de manières très réductrices au regard des évolutions réelles accessibles à partir de sources d'information non disponibles à l'heure des premiers travaux. La reconception des systèmes d'information s'est avéré nécessaire tant du point de vue des valorisations possibles des connaissances apportées sur le bassin (continuités spatiales et temporelles des sources d'informations) que de leur utilisation par les équipes de modélisation.

Le travail présenté dans ce document représente le travail réalisé par l'unité INRA-SAD-ASTER Mirecourt dans le cadre d'une convention d'aide ARMINES-INRA-AESN débutée en novembre 2015 et qui a visé à une refonte en profondeur des systèmes d'information des pratiques agricoles sur le bassin Seine-Normandie à travers l'homogénéisation des maillages agricoles mais également la prise en compte plus fine des dynamiques temporelles tant du point de vue des assolements (dynamiques des prairies) que des pratiques culturales (fertilisation...). Ce travail a également été l'occasion de prospecter des pistes d'amélioration notamment une spatialisation fine des systèmes de culture à l'échelle des types de sols régionaux. Un exercice de prospective, fondé sur un raisonnement systémique, a été conduit et a abouti à la construction de deux scénarii d'évolution de l'agriculture sur le bassin à l'horizon de la moitié du XXI^{ème} siècle.

Le travail a bénéficié d'une aide de l'Etat gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme d'Investissements d'avenir portant la référence ANR-10-EQPX-17 (Centre d'Accès Sécurisé aux Données – CASD).

1. Evolution des activités agricoles sur le bassin Seine-Normandie : quelques rappels

Ce chapitre reprend les principaux résultats issus de la convention d'aide AESN 1 045 071 (1) 2013 et en particulier du volume 1/4 « Evolution des systèmes de culture sur le bassin Seine-Normandie depuis les années 2000 : construction d'une base de données spatialisée sur les pratiques agricoles ». En effet, de nombreux résultats issus de ce travail sont utilisés dans le présent document dont il paraissait important de faire quelques rappels pour une meilleure compréhension du contenu de ce rapport.

1.1 La zone d'étude

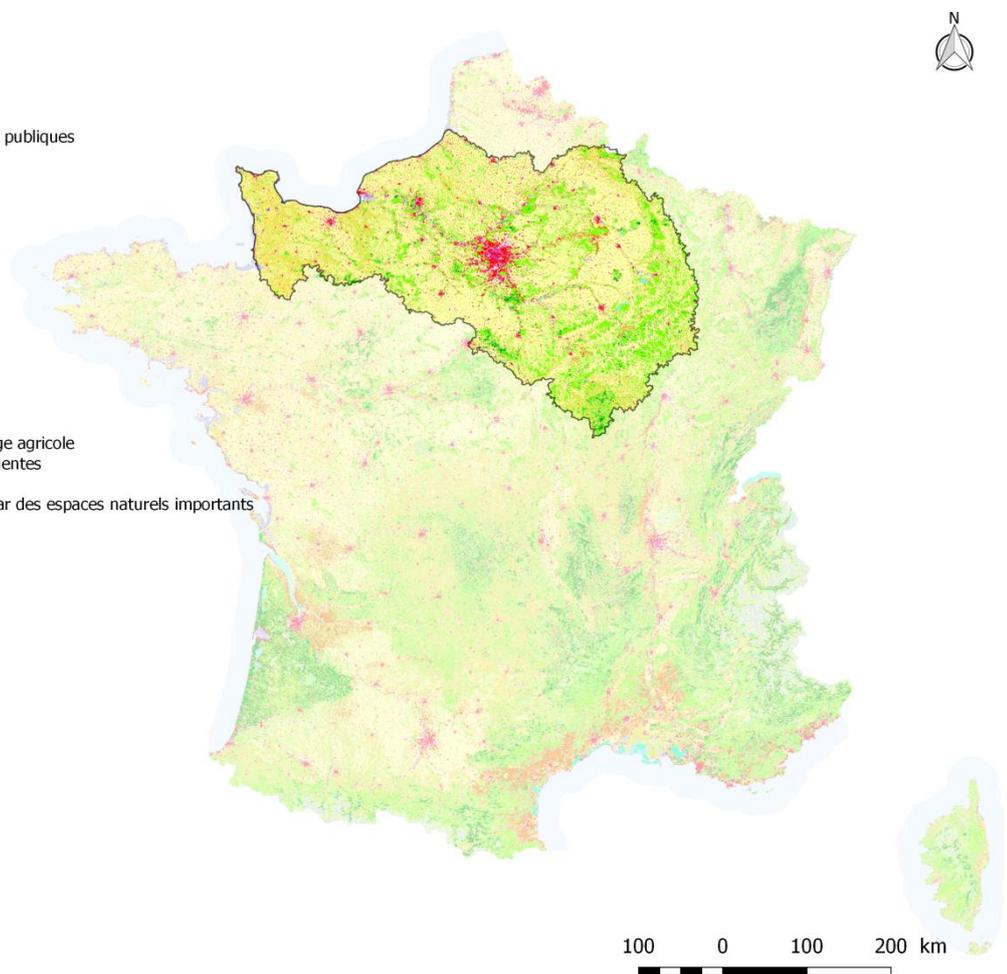
La zone étudiée concerne l'ensemble du bassin Seine-Normandie présenté sur la Carte 1. Elle correspond au bassin hydrographique de la Seine ainsi que les aquifères bas-normands. L'aire étudiée ne représente pas stricto sensu le territoire administré par l'agence de l'eau Seine-Normandie : certains territoires mitoyens du bassin (notamment au Nord et au Sud) ont été rajoutés dans la zone d'étude pour les besoins de la modélisation. Nous entendrons cependant comme bassin Seine-Normandie l'ensemble du territoire présenté ci-dessous.

L'occupation du sol du bassin est hétérogène : tissus urbain dense en Île de France, cultures annuelles sur une grande moitié centrale du bassin, systèmes prairiaux en Basse Normandie et forêts à l'Est.

Légende

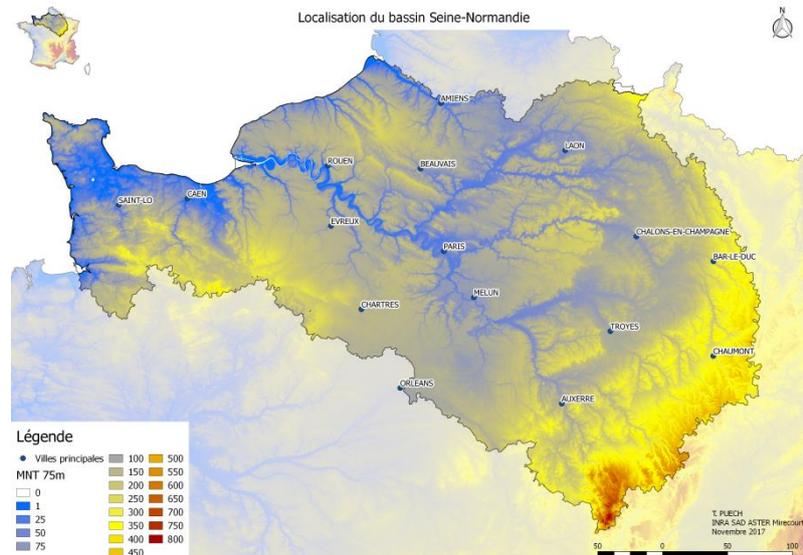
Corine Land Cover 2012

- Tissu urbain continu
- Tissu urbain discontinu
- Zones industrielles ou commerciales et installations publiques
- Réseaux routier et ferroviaire et espaces associés
- Zones portuaires
- Aéroports
- Extraction de matériaux
- Décharges
- Chantiers
- Espaces verts urbains
- Equipements sportifs et de loisirs
- Terres arables hors périmètres d'irrigation
- Périmètres irrigués en permanence
- Rizières
- Vignobles
- Vergers et petits fruits
- Oliveraies
- Prairies et autres surfaces toujours en herbe à usage agricole
- Cultures annuelles associées à des cultures permanentes
- Systèmes culturaux et parcellaires complexes
- Surfaces essentiellement agricoles, interrompues par des espaces naturels importants
- Territoires agroforestiers
- Forêts de feuillus
- Forêts de conifères
- Forêts mélangées
- Pelouses et pâturages naturels
- Landes et broussailles
- Végétation sclérophylle
- Forêt et végétation arbustive en mutation
- Plages, dunes et sable
- Roches nues
- Végétation clairsemée
- Zones incendiées
- Glaciers et neiges éternelles
- Marais intérieurs
- Tourbières
- Marais maritimes
- Marais salants
- Zones intertidales
- Cours et voies d'eau
- Plans d'eau
- Lagunes littorales
- Estuaires
- Mers et océans



Carte 1 : Localisation du bassin Seine-Normandie sur fond d'occupation du sol (Source : CLC 2006)

Le bassin est composé principalement de formations sédimentaires concentriques organisés en « piles d'assiettes » et dont la datation s'étale du secondaire inférieur (Trias) au tertiaire supérieur. Cet ensemble repose sur un socle granitique hercynien dans la continuité des massifs montagneux en périphérie du bassin (massif Armoricaïn, Ardennes, massif Central). Le bassin (appelé communément bassin parisien) est une zone principalement de plaine. Au Sud-Est apparaissent les premiers reliefs du massif Central (Morvan). Localement, les cours d'eau marquent la topographie formant des coteaux (Carte 2).



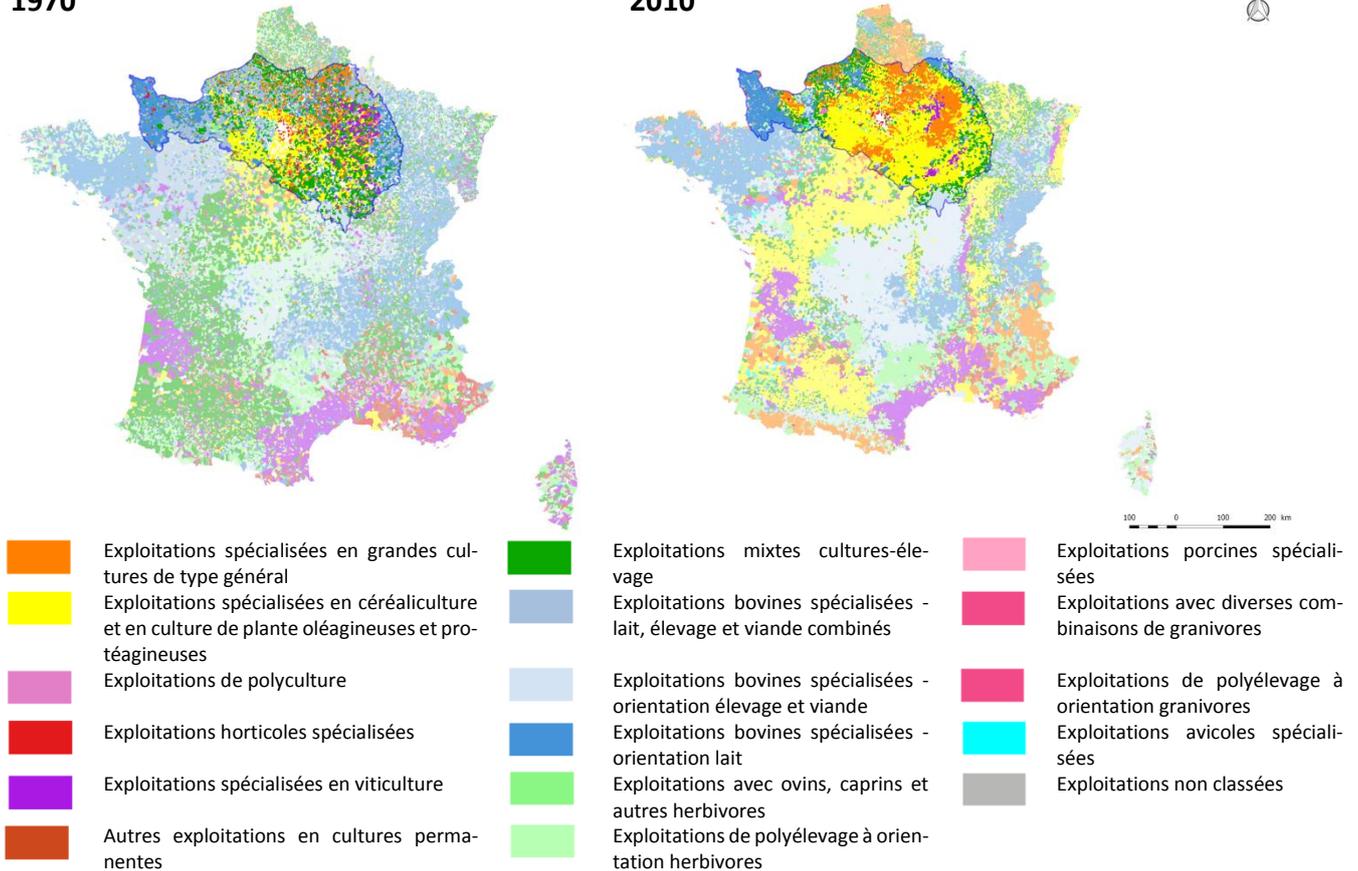
Carte 2 : Localisation et topographie du bassin Seine-Normandie

1.2 Dynamiques des exploitations agricoles

Depuis la décennie 1970, l'agriculture Française et en particulier l'agriculture du bassin connaît de profondes mutations. La Carte 3 présente une cartographie des orientations technico-économiques des exploitations agricoles françaises (OTEX) représentant la spécialisation des exploitations agricoles. Si cette représentation réduit la dimension de la diversité des formes d'exploitations présentes par commune à la forme majoritaire, la situation en 2010 met en évidence la spécialisation d'une grande partie du bassin vers des productions céréalières au centre et un élevage bovin lait en Normandie et bovin viande dans le Morvan.

1970

2010



Carte 3 : Cartographie des orientations technico-économiques des exploitations agricoles majoritaires par commune (source RA 1970 et RA 2010, traitements INRA ASTER)

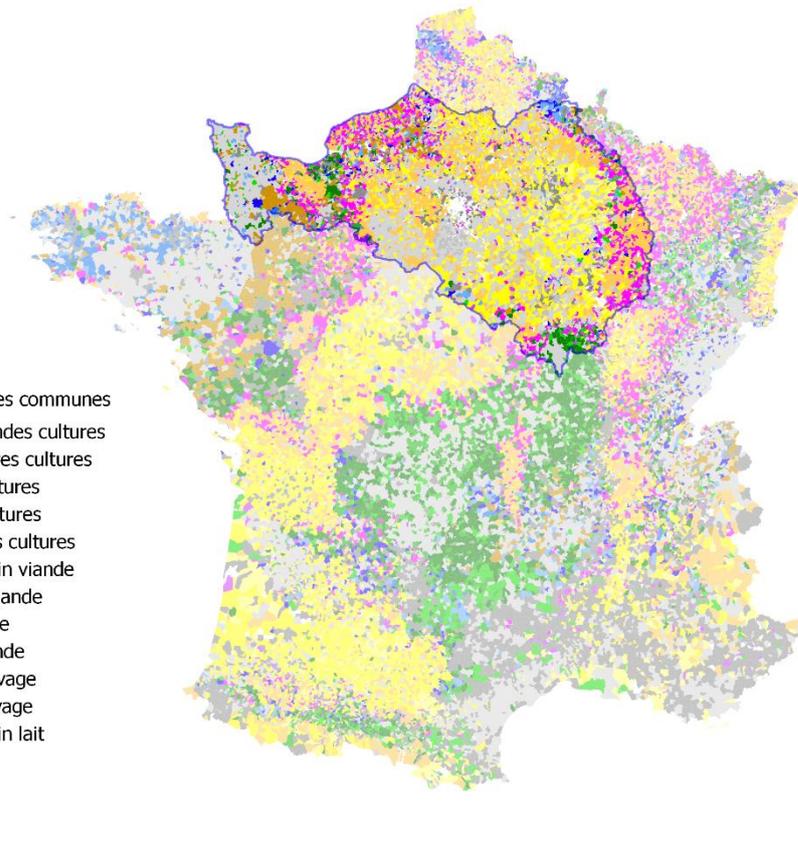
Représenté sous une forme différence sur la Carte 4 avec la mise en évidence des transitions des OTEX dominantes par communes (évolution entre 1970 et 2010 de l'OTEX majoritaire), on peut mettre en évidence une spécialisation de l'ensemble du territoire métropolitain avec une orientation vers la céréaliculture dans une large moitié Nord de la France, la région Poitou-Charentes, l'Alsace et le bassin Aquitain, une spécialisation vers l'élevage laitier en Bretagne et Normandie et allaitant dans le massif central.



Légende

Evolution de l'OTEX majoritaire des communes

- Polyculture élevage vers grandes cultures
- Polyculture-élevage vers autres cultures
- Autre OTEX vers grandes cultures
- Bovin mixte vers grandes cultures
- Autres élevages vers grandes cultures
- Polyculture-élevage vers bovin viande
- Bovin lait/mixte vers bovin viande
- Polyélevage vers bovin viande
- Spécialisation vers bovin viande
- Cultures vers polyculture-élevage
- Elevage vers polyculture-élevage
- Polyculture-élevage vers bovin lait
- Polyélevage vers bovin lait
- Spécialisation vers bovin lait
- Invariant
- Données manquantes
- Autre transition



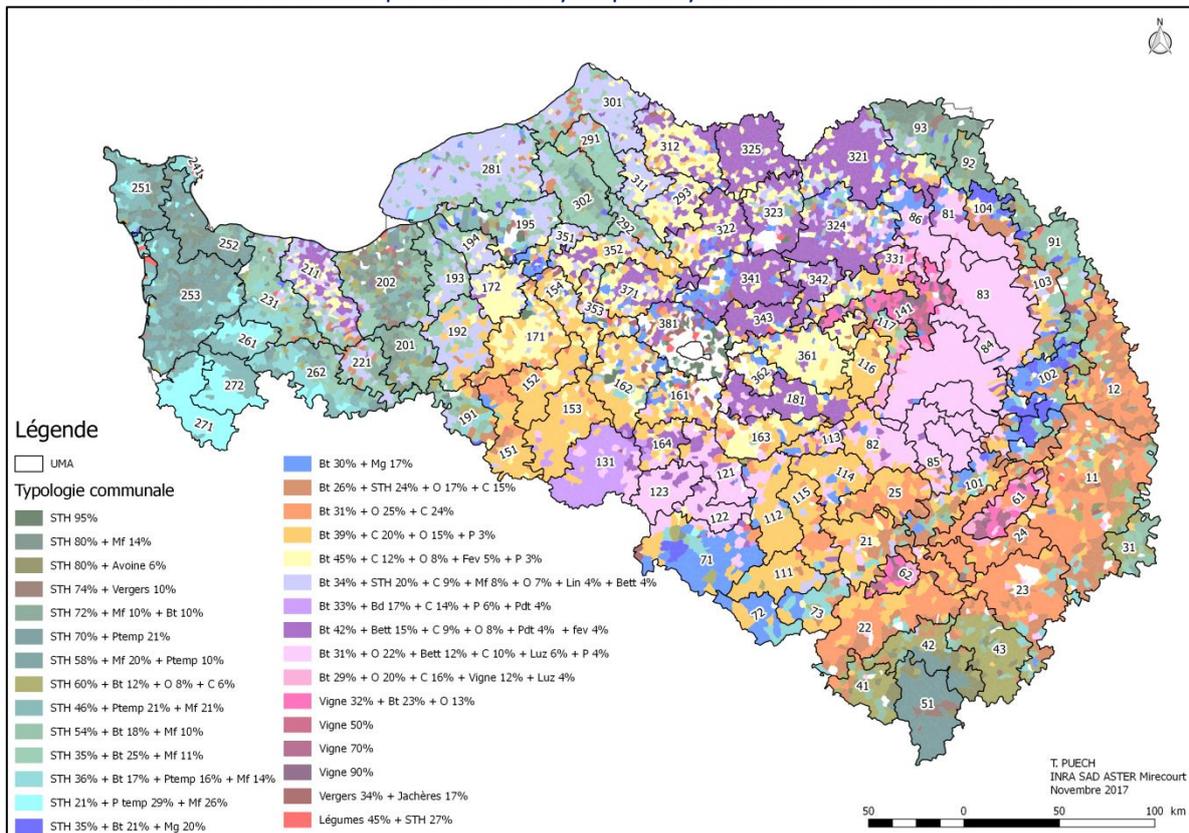
100 0 100 200 km

Carte 4 : Cartographie de l'évolution des OTEX agricoles majoritaires par commune entre 1970 et 2010 (source RA 1970 – 2010, traitements INRA ASTER)

Concernant plus directement le bassin Seine-Normandie, la Carte 4 met en avant un fort recul des formes d'exploitation de type polyculture-élevage dans l'Est du bassin, la Brie et une partie de la Haute-Normandie. D'autres régions comme la Champagne humide, le Bessin, le Pays d'Ouche ou le Pays de Caux voient leurs exploitations compléter leurs activités d'élevage par des ateliers de grandes cultures de plus en plus importants dans les activités des exploitation, traduisant un recul des activités d'élevage au profit des cultures annuelle et transformant ainsi des OTEX d'élevage vers des OTEX de type polyculture-élevage.

1.3 Le maillage spatial agricole du bassin Seine-Normandie

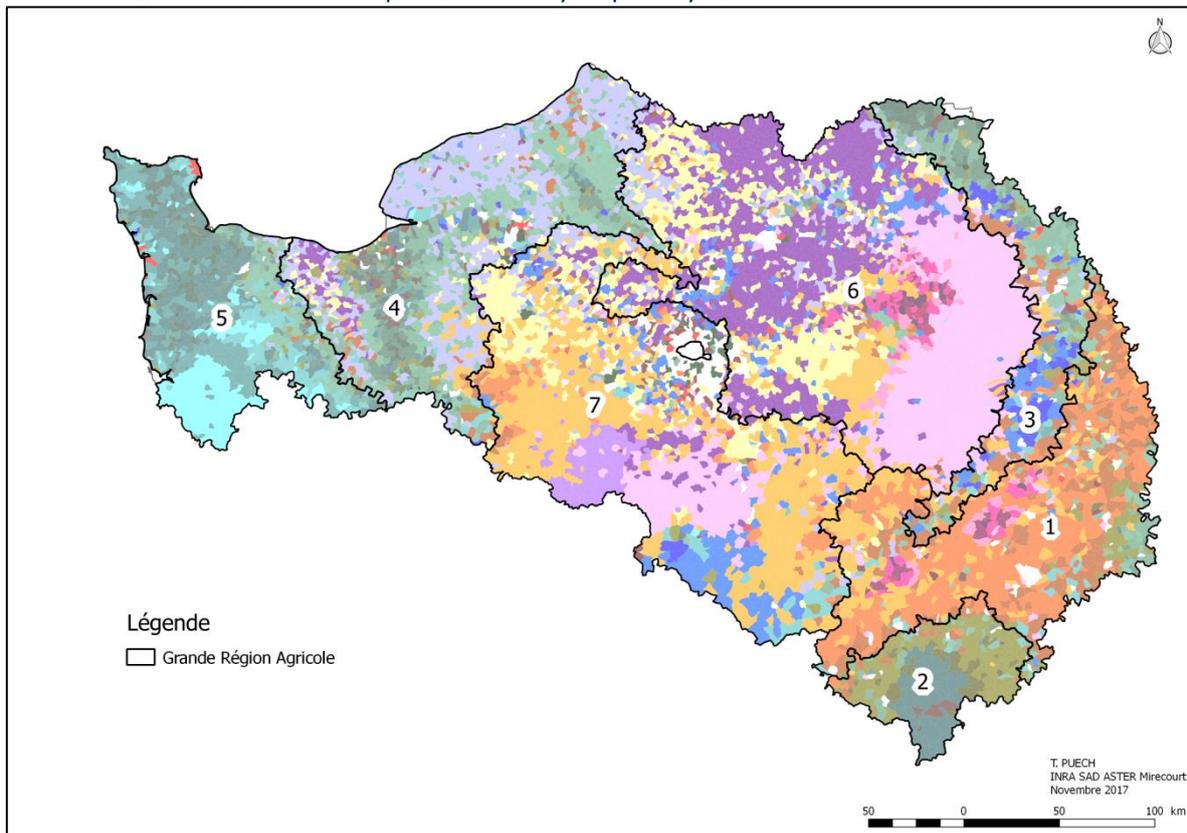
A partir d'une analyse multivariée des assolements des communes du bassin (Recensement Agricole 2010), du découpage pré-existant en petites régions agricoles et d'enquêtes auprès d'une cinquantaine de professionnels agricoles du bassin, le bassin Seine-Normandie a été segmenté en 95 Unités de Modélisation Agricole (UMA). La Carte 5 présente la délimitation spatiale des UMA.



Carte 5 : Définition des Unités de Modalisation Agricole sur fond de typologie des assolements communaux

Les 95 UMA ont été regroupées en 7 Grandes Régions Agricoles (GRA) relativement homogènes du point de vue des occupations du sol : la région herbagère du Morvan (GRA n°2), le croissant des « petites terres à cailloux » à l'Est du bassin (GRA n°1), un croissant plus herbager des Ardennes à la Champagne humide (GRA n°3), une région très céréalière au sud du bassin parisien (GRA n°7), une large façade nord-ouest caractérisée par des cultures diversifiées (lin, betteraves) (GRA n°4) et enfin la Basse Normandie dominée par des surfaces herbagères et des cultures fourragères de type maïs (GRA n°5).

Le contour des GRA est représenté sur la Carte 6.



Carte 6 : Délimitation des 7 Grandes Régions Agricoles sur fond de typologie des assolements communaux

1.4 La caractérisation des systèmes de culture

La caractérisation des systèmes de culture est réalisée (Puech et al, 2015) à l'échelle de chaque UMA sur la période 2006-2014.

1.4.1 Caractérisation des successions de cultures

Les successions de cultures ont été définies à travers l'analyse de l'enquête TerUti-Lucas et complétée à partir d'enquêtes auprès d'acteurs. La fréquence des successions de culture a été définie de manière à reproduire le plus fidèlement possible l'assolement de l'UMA (source RA 2010).

1.4.2 Caractérisation des itinéraires techniques

L'analyse de l'enquête pratiques culturales 2011 a permis, à l'échelle des GRA, de caractériser un certain nombre de modes de conduite des cultures. Ces modes de conduite ont ensuite été soumis à une cinquantaine d'acteurs rencontrés sur le bassin en vue d'affiner cette caractérisation au regard des spécificités locales difficilement accessibles à partir de statistiques nationales. Un travail de synthèse a ensuite été conduit afin d'identifier, caractériser et quantifier une diversité des itinéraires techniques pratiqués par culture.

1.4.3 Reconstitution des systèmes de culture

Les systèmes de culture sont reconstitués par association des itinéraires techniques aux successions de cultures en respectant certaines logiques agronomiques (relation précédent / suivant, irrigation, fumure organique...). Ainsi, chaque UMA est décrite par une quinzaine de systèmes de culture différents.

Les systèmes reconstitués sont regroupés et structurés dans la base de données Agricole Régionalisée sur le bassin SEine-NormandiE (ARSEINE) qui dans sa version 2.2 décrit et spatialise une diversité de systèmes de culture sur la période 2006-2014 (Puech et al, 2015).

2. Dynamiques temporelles des systèmes de culture : homogénéisation des bases de données agricoles

2.1 Problématique : pourquoi homogénéiser les bases de données ?

- Reconstituer une continuité dans l'évolution des assolements

Dans les versions antérieures des bases de données Arseine_old (base de données sur le bassin de la Seine 1970-2006 et sur les bocages normands 1970-2009) et Arseine (version 2.2) telle que proposée dans le Volume 1 du rapport de projet 1 045 071 (1) 2013, les pratiques agricoles (successions de cultures et itinéraires techniques) sont décrits à l'échelle des Unités de Modélisation Agricole par blocs temporels d'une dizaine d'années qualifiés de périodes homogènes. Chaque système de culture est considéré comme invariant au sein de la période tant au niveau des assolements, des pratiques agricoles que de sa fréquence sur le territoire. Or les assolements et les pratiques agricoles peuvent varier sur des pas de temps plus rapides, en réponse notamment à des évolutions de réglementation ou de politiques agricoles. La Figure 1 présente par exemple l'évolution continue des assolements des principales cultures sur le bassin.

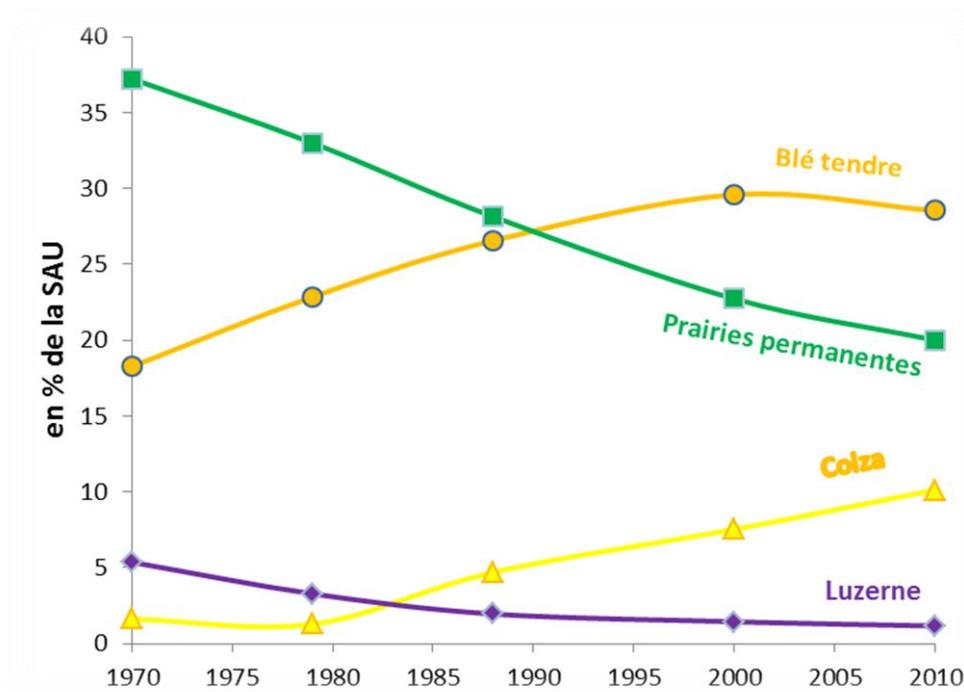


Figure 1 : Evolution des quelques occupations de sol caractéristiques sur le territoire du bassin de la Seine-Normandie entre 1970 et 2010 (Sources : Recensements Agricoles)

Or, la juxtaposition des différentes bases de données précédemment citées pose question sur la représentation de certaines pratiques pouvant avoir un impact significatif sur les problématiques de contamination des eaux par les nitrates (paragraphe 2.1 et 2.3 de la proposition d'étude faite par l'INRA et ARMINES à l'AESN). En effet, la Figure 2 reconstitue l'évolution des assolements d'une UMA du bassin

tels qu'issus des différentes versions de la base de données sur le bassin de la Seine (Arseine_old sur la période 1970-2005 et Arseine_v2.2 sur la période 2006-2014).

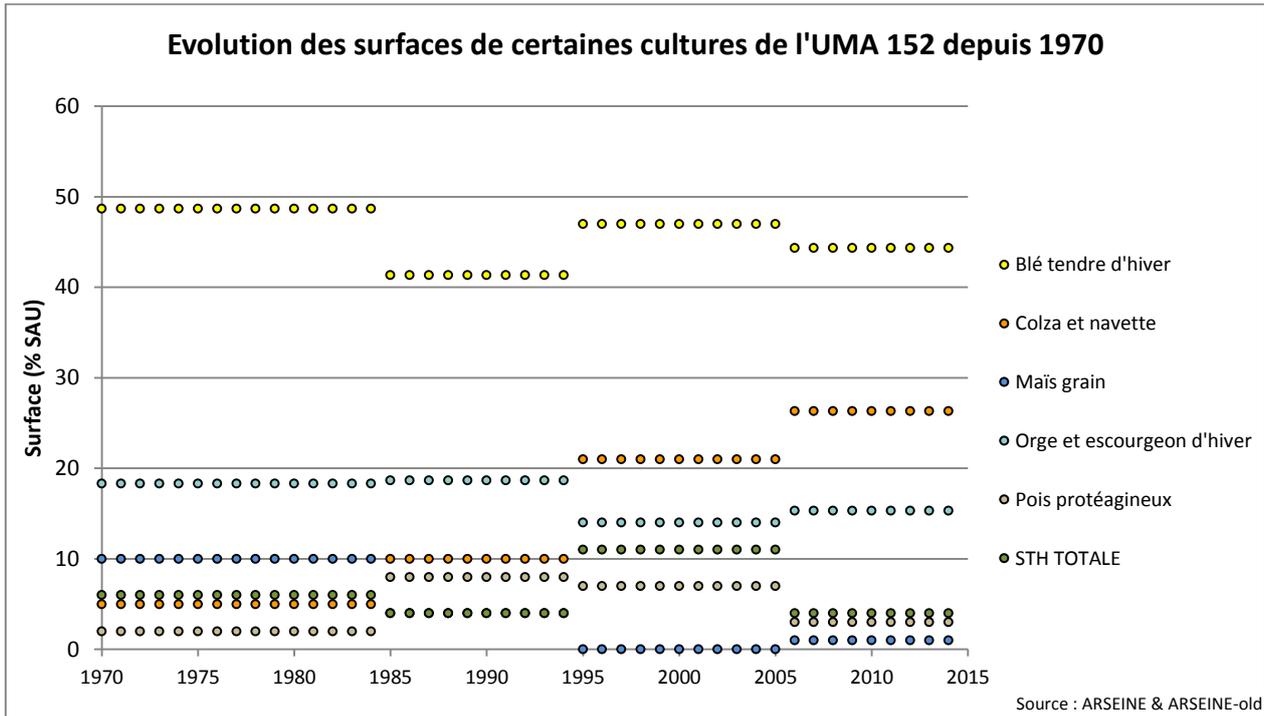


Figure 2 : assolements sur l'UMA 152 à partir des données d'ARSEINE 2.2 (2006-2014) et ARSEINE-old (1970-2006)

Par ailleurs, la Figure 3 présente l'évolution des assolements sur le département d'Eure-et-Loir¹ sur la même période que la Figure 2. La comparaison de ces deux figures met en évidence (i) les discontinuités temporelles issues de la structuration en périodes homogènes utilisées jusqu'alors et (ii) certaines lacunes dues à l'absence de certaines données lors de la construction des bases de données initiales (distinction orge d'hiver – orge de printemps).

¹ A noter que l'UMA 152 n'est qu'une des quatre UMA présentes sur le département d'Eure-et-Loir : il n'y a donc pas lieu de comparer la Figure 2 et la Figure 3 les valeurs absolues des assolements.

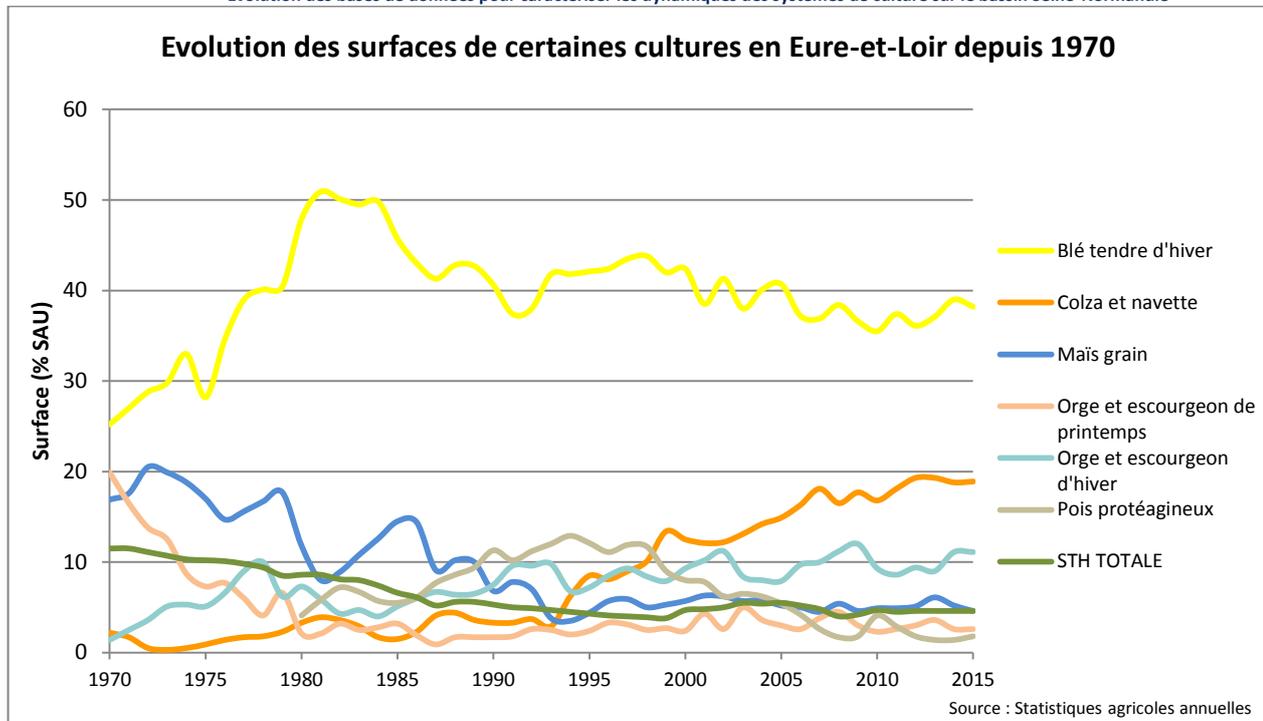


Figure 3 : assolements sur le département d'Eure-et-Loir depuis 1970

L'objectif de cette partie du travail est d'améliorer des dynamiques temporelles représentées dans les bases de données (i) pour caractériser plus finement la nature des cultures à partir de sources d'informations nouvellement disponibles (distinction orge de printemps / orge d'hiver) et (ii) d'améliorer la continuité temporelle des assolements (cultures annuelles et prairies permanentes) tout en conservant la notion de période homogène indispensable pour la partie modélisation.

- Améliorer la représentation de certaines pratiques

Dans les bases de données caractérisant les systèmes de culture passés (1970-2005), certaines opérations culturales étaient prises en compte sous forme binaire, ne pouvant intégrer de modulation de fréquence² (fumure organique, irrigation, couvert intermédiaire).

La structuration de la base de données ARSEINE (Puech et al, 2015), plus souple, permet d'affiner la caractérisation de ces pratiques par validation avec des sources d'information (recensements agricoles).

- Le maillage spatial

Jusqu'à présent, 3 types de maillages spatiaux étaient utilisés : les cantons de Basse-Normandie de 1970 à 2009, les Petites régions agricoles du bassin de la Seine de 1970 à 2005 et les Unités de Modélisation Agricoles de 2006 à 2014. Cette diversité de maillages est relativement complexe à gérer d'une part pour les équipes de modélisation et d'autre part pour la caractérisation d'indicateurs agricoles spatialisés sur le temps long.

² Par exemple : si moins de 50% d'une culture recevait un apport d'azote organique, cette culture était considérée ne pas recevoir de fumure organique.

2.2 Sources d'informations

- Bases de données préexistantes

La travail d'homogénéisation se base sur la base de données ARSEINE 2.2 (sur la période 2006-2014) et sur le contenu des bases de données *bassin de la Seine* (1970-2005, Benoit et al, 2000), *la base de données bocage normand* (1970-2009, Schott et al, 2010).

- Les recensements agricoles

Ce sont des recensements exhaustifs des exploitations agricoles conduits tous les 10 ans environ (1970, 1979, 1988, 2000 et 2010). Les données des recensements agricoles sont disponibles via le Centre d'Accès Sécurisé Distant (CASD). Une large diversité d'information est disponible à la maille communale : assolements, OTEX, effectifs animaux...

- L'enquête Ter-Uti

Cette enquête disponible de 1981 à 2003 présente l'occupation du sol sur environ 71.000 points agricoles sur le bassin. L'utilisation d'un logiciel de fouille de données³ permet d'extraire les régularités de séquences de cultures sur un ensemble de points agricoles et d'en déduire les successions de cultures majoritaires à l'échelle des Unités de Modélisation Agricoles.

- Les statistiques agricoles annuelles – SAA

Les statistiques agricoles annuelles ont été mobilisées pour apprécier l'évolution des surfaces cultivées et des rendements pour les principales cultures du bassin. Elles sont établies annuellement à l'échelle des départements par les services des directions régionales de l'agriculture et de la forêt à partir de diverses enquêtes statistiques sur des échantillons représentatifs ou exhaustifs.

- L'enquête « Pratiques culturales »

L'enquête pratiques culturales a été mise en place la première année en 1994 puis a été renouvelée en 2001, 2006 et 2011 (pour les grandes cultures). Cette enquête est basée sur un échantillon de parcelles sélectionnés par département sur des critères de représentativité. L'échantillon varie selon les années et les départements enquêtés.

- Enquêtes auprès d'acteurs de la profession agricole

Des enquêtes sous format papier ont été réalisées à partir du début des années 2000 dans le cadre de la construction des deux bases de données précédemment citées auprès d'acteurs de la profession agricole (financées dans le cadre du PIREN-Seine). Ces enquêtes permettent de caractériser les itinéraires techniques (et dans une moindre mesure les successions de cultures) sur les décennies 1970, 1980 et

³ Schott C., Gillet E., Jacquet A. (2012). Teruti-Miner : un logiciel dédié à la fouille de données annuelles sur l'occupation du sol.

1990 alors que l'enquête pratiques culturelles n'était pas encore conduite par le SSP. Ce travail, conduit auprès d'acteurs de la profession agricole pour partie déjà en retraite à l'époque, serait vraisemblablement difficile à conduire actuellement compte tenu du recul temporel nécessaire (> 40 ans) pour notamment enquêter des conseillers agricoles de l'époque et de l'absence de statistiques agricoles généralisées avant les années 1990. Ce travail d'archivage a permis de reconstituer 2.071 itinéraires techniques collectés à l'époque auprès de 92 acteurs agricoles (chambres d'agriculture, organismes privés...).

- Bases de données parcellaires locales

Des bases de données locales sur les pratiques agricoles issues d'enquêtes parcellaires en exploitations peuvent exister sur des territoires d'extension réduite ayant bénéficié d'un travail de recensement spécifique, en particulier sur les aires d'alimentation de captages. Mais ces travaux de recensement, lorsqu'ils sont disponibles, sont hétérogènes d'une part sur leur localisation dans le territoire et d'autre part sur la structure et le contenu des pratiques enquêtées. Pour ces raisons, ces bases de données n'ont pas été utilisées dans la méthode de Puech et al, 2015. Cependant, ces bases de données locales peuvent être utilisées pour valider la méthode ponctuellement sur une ou plusieurs UMA.

2.3 Méthode

Le maillage spatial retenu pour l'homogénéisation des bases de données est l'Unité de Modélisation Agricole. Pour les besoins de la modélisation, il est nécessaire de conserver la notion de période homogène sur laquelle sont décrits les systèmes de culture. Cependant pour représenter des dynamiques infra-périodiques des systèmes de culture (assolements, pratiques agricoles), il est nécessaire (i) de mieux caractériser certaines dynamiques temporelles (assolements dont les prairies permanentes) et (ii) de faire évoluer la structure des bases de données et notamment le rôle joué par les périodes homogènes pour représenter ces dynamiques dans les bases de données.

- Estimation de l'évolution des assolements des UMA

Deux sources d'information sont utilisées :

- les recensements agricoles (1970, 1979, 1988, 2000⁴) permettant de fournir avec précision des assolements des UMA « à un instant t ».

- Les statistiques agricoles annuelles permettant de fournir les dynamiques temporelles nécessaires à la reconstitution d'une continuité des données entre deux recensements agricoles. Les statistiques agricoles annuelles, si elles présentent l'inconvénient d'être à la résolution du département

⁴ Le recensement agricole 2010 ayant déjà été utilisé pour la construction d'ARSEINE 2.2.

(maille administrative rarement cohérente au regard des activités agricoles), elles ont un grand intérêt dans nomenclature utilisée et la profondeur temporelle disponible. Cela leur confère un grand intérêt comparativement à d'autres sources de données annualisées et notamment le Registre Parcellaire Graphique qui, certes est spatialement beaucoup plus fin (îlot cultural) mais dont la nomenclature est beaucoup plus agrégée et la profondeur temporelle (ultérieure à 2006) incompatible au regard des horizons explorés (à partir de 1970).

La suite de ce paragraphe présente la méthode utilisée pour estimer l'évolution annuelle des assolements à l'échelle des UMA.

Soient :

i	Une UMA donnée
$S_{c,i}^n$	La surface réelle de la culture c de l'UMA i, exprimée en % de SAU, l'année n. Cette valeur est issue du recensement agricole. Par conséquent n est une des années du RA
$V_{c,j}^m$	La surface réelle de la culture c du département j exprimée en % de SAU, l'année m.
$K_{c,j}^n$	L'indice calculé tel que : $k_{c,j}^n = S_{c,i}^n / V_{c,j}^n$
$E_{c,i}^m$	La surface estimée de la culture c exprimée en % de SAU de l'UMA i, l'année m.

Cadre théorique

Etape 1 : calcul des indices aux années de recensement agricole

Année	Surface de la culture dans l'UMA	Surface de la culture dans le département	Indice
N1	$S_{c,i}^{N1}$	$V_{c,j}^{N1}$	$K_{c,i}^{N1}$
N2	$S_{c,i}^{N2}$	$V_{c,j}^{N2}$	$K_{c,i}^{N2}$
N3	$S_{c,i}^{N3}$	$V_{c,j}^{N3}$	$K_{c,i}^{N3}$
N4	$S_{c,i}^{N4}$	$V_{c,j}^{N4}$	$K_{c,i}^{N4}$
N5	$S_{c,i}^{N5}$	$V_{c,j}^{N5}$	$K_{c,i}^{N5}$

Etape 2 : Estimation des indices intercensitaires

Année	Surface de la culture dans l'UMA	Surface de la culture dans le département	Indice
N1	$S_{c,i}^{N1}$	$V_{c,j}^{N1}$	$K_{c,i}^{N1}$
Nn			$K_{c,i}^{Nn}$
N2	$S_{c,i}^{N2}$	$V_{c,j}^{N2}$	$K_{c,i}^{N2}$

Tel que : $K_{c,i}^{Nn} = K_{c,i}^{N1} + (Nn - N1) * (K_{c,i}^{N2} - K_{c,i}^{N1}) / (N2 - N1)$

Etape 3: Estimation des surfaces intercensitaires

Année	Surface de la culture dans l'UMA	Surface de la culture dans le département	Indice
N1	$S_{c,i}^{N1}$	$V_{c,j}^{N1}$	$K_{c,i}^{N1}$
Nn	$E_{c,i}^{Nn}$	$V_{c,j}^{Nn}$	$K_{c,i}^{Nn}$
N2	$S_{c,i}^{N2}$	$V_{c,j}^{N2}$	$K_{c,i}^{N2}$

Tel que : $E_{c,i}^{Nn} = V_{c,j}^{Nn} * K_{c,i}^{Nn}$

Exemple : Drouais Thimerais (département 76)

Etape 1

Année	Blé (UMA 152, %SAU)	Blé (Dep 28, %SAU)	Indice
1970	27.3	25.2	1.08
1979	47.7	40.4	1.18
1988	49.4	42.8	1.15
2000	46.4	42.4	1.09
2010	42.8	35.6	1.2

Etape 2 :

Année	Blé (UMA 152, %SAU)	Blé (Dep 28, %SAU)	Indice
1970	27.3	25.2	1.08
	...		
1979	47.7	40.4	1.18
	...		
1985			
	...		
1988	49.4	42.8	1.15
	...		
2000	46.4	42.4	1.09
	...		
2010	42.8	35.6	1.2

Etape 3 :

Année	Blé (UMA 152, %SAU)	Blé (Dep 28, %SAU)	Indice
1970	27.3	25.2	1.08
	...		
1979	47.7	40.4	1.18
	...		
1985	53.0	45.7	1.16
	...		
1988	49.4	42.8	1.15
	...		
2000	46.4	42.4	1.09
	...		
2010	42.8	35.6	1.2

Seules les principales cultures sont mobilisées dans ce travail (au nombre de 25⁵), excluant les cultures très faiblement présentes (porte-graine, miscanthus, chanvre...) et non modélisables par les outils actuellement disponibles. A la fin de l'étape 3, une opération de mise aux normes est effectuée pour corriger les fréquences de manière à ce que la somme des fréquences des 25 cultures soit exactement égale à 100%. Cette opération impacte à la marge les fréquences (correction de l'ordre de 1% au plus) et dont l'impact sur la fréquence des cultures est négligé par la suite.

- Reconstitution des assolements à partir des successions de cultures ARSEINE

La structure des bases de données construites jusqu'alors imposaient une fréquence fixe des successions de cultures (et donc des assolements) au sein d'une période homogène (Figure 2).

L'enjeu est ici d'adapter la structure des bases de données pour permettre un ajustement de la fréquence des successions de cultures afin de mieux représenter les évolutions d'assolements tout en conservant la notion de période homogène d'une dizaine d'années (des périodes homogènes d'« une année » n'étant pas possibles pour la modélisation). Cette notion de période homogène (i) structure la période de validité des itinéraires techniques décrits à dire d'acteurs et (ii) est indispensable à la modélisation.

Un module, dont le cadre théorique est décrit ci-après, a été rajouté à la base de données pour permettre, à partir de fonctions mathématiques simples dites modèles de successions, d'ajuster la fréquence des successions avec un pas de temps annuel (voir détails techniques en Annexe 1).

5 modèles de successions ainsi ont été conçus :

- Evolution linéaire. Ce modèle a été mis en place pour modéliser l'apparition ou la disparition régulière d'une succession de cultures à la place d'une autre. Dans d'exemple de la Figure 4, la succession bleue est pour partie remplacée en partie par la succession rouge au sein de la période homogène 1970-1980.

⁵ Blé tendre, blé dur, orge d'hiver, orge de printemps, avoine, triticale, autres céréales, maïs grain, betterave, colza, tournesol, autres oléagineux, lin, pois, féverole, maïs fourrage, autres fourrages annuels, prairies artificielles (dont luzerne), prairies temporaires semées, surfaces toujours en herbe (dont prairies permanentes), légumes, pommes de terres, fleurs, vignes et jachères.

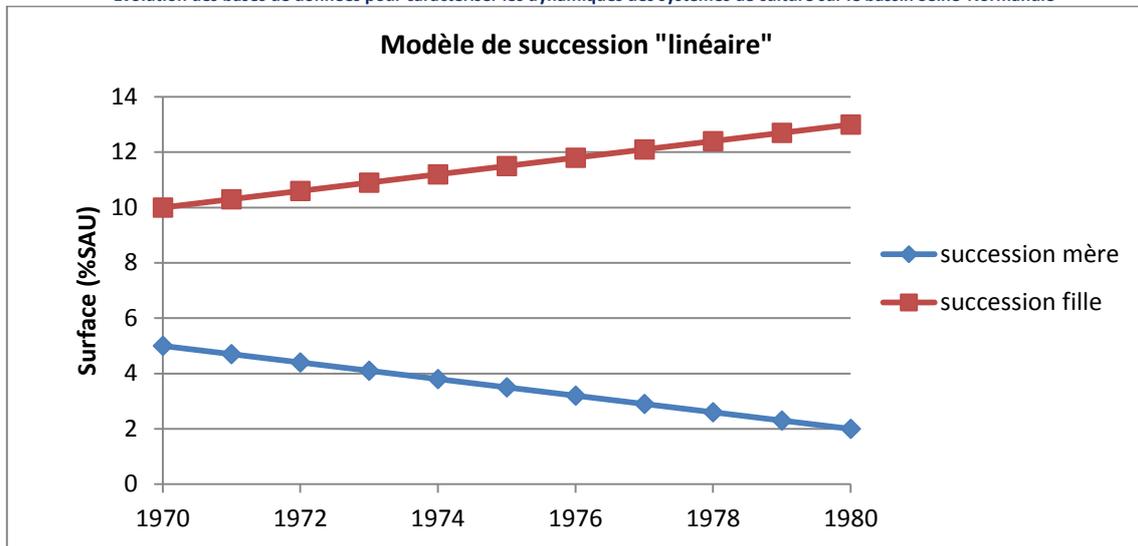


Figure 4 : modèle de successions « linéaire »

Paramètres :	t : année, t_0 : année initiale (début de période) S(t) : surface l'année t (exprimée en fréquence de SAU) α : taux de transformation (en % de SAU par an)
Equation de la succession mère	$S(t) = S(t_0) - \alpha \times (t - t_0)$
Equation de la succession fille	$S(t) = S(t_0) + \alpha \times (t - t_0)$

- Evolution exponentielle : Ce modèle a été mis en place pour modéliser des phénomènes d'apparition disparition en début ou fin de période homogène. Dans l'exemple de la Figure 5, la succession bleue est remplacée en partie par la succession rouge. Ce modèle a été peu utilisé car un profil similaire peut être réalisé avec les modèles sigmoïde ou normale, plus génériques.

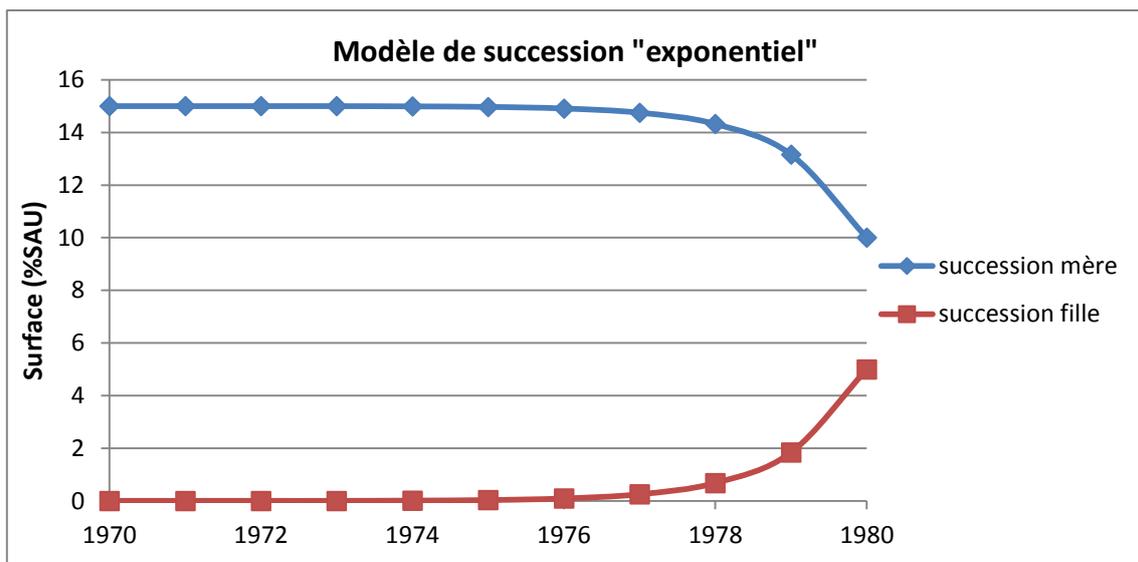
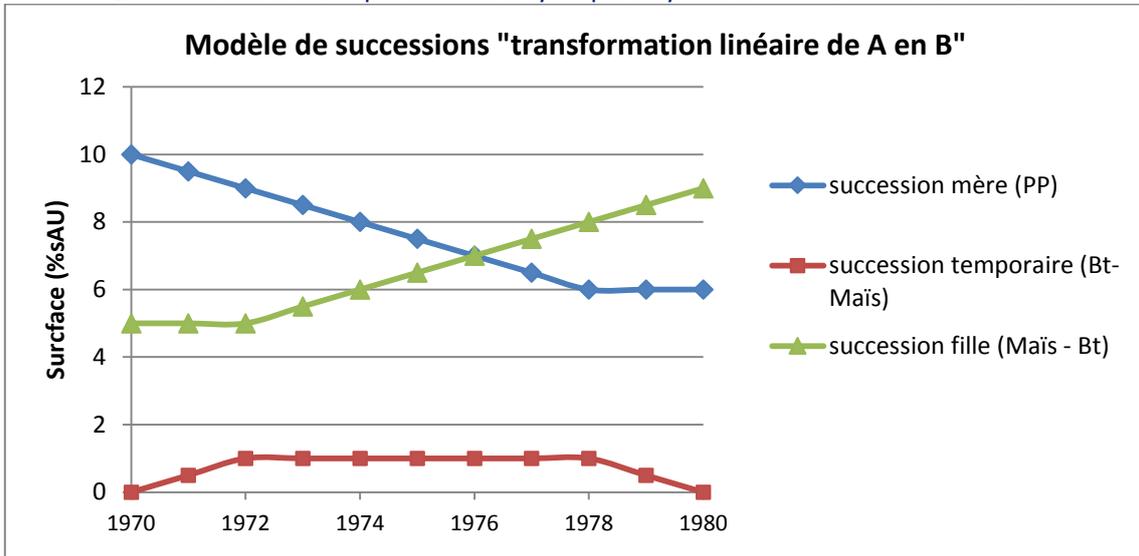


Figure 5 : modèle de successions « exponentiel »

Paramètres :	<p>t : année, t_0 : année initiale (début de période), t_n : année finale (fin de période)</p> <p>$S(t)$: surface l'année t (exprimée en fréquence de SAU)</p> <p>S_{max} : fréquence maximale réalisée l'année pour $t=t_n$ (en % de SAU par an)</p>
Equation de la succession mère	$S(t) = S(t_0) - \frac{e^{(t-t_0)} - 1}{e^{(t_n-t_0)} - 1} \times S_{max}$
Equation de la succession fille	$S(t) = \frac{e^{(t-t_0)} - 1}{e^{(t_n-t_0)} - 1} \times S_{max}$

- La transformation linéaire de A en B. Ce modèle de successions est mis en place pour modéliser spécifiquement le retournement des prairies. Dans ce modèle, on considère une succession mère (une prairie permanente) qui, sur l'ensemble de la période homogène va perdre x% en fréquence au profit d'une succession fille (dans le cas de la Figure 6, Maïs – Blé représentée en vert). Mais le passage de la succession mère à la succession fille passe par une succession transitoire. Contrairement à la succession fille, on estime que la succession transitoire (ou de transition) bénéficie d'un arrière effet ou effet « mémoire » de la succession mère. Concrètement, ce serait le cas d'une succession Blé-Maïs (en rouge sur la Figure 6) où les itinéraires techniques de chacun seraient adaptés par exemple au niveau de la fertilisation, par la minéralisation importante de l'azote organique hérité de la prairie, et contrairement à la succession fille (en vert sur la Figure 6) où l'on considère qu'il n'y a plus d'arrière effet lié au retournement de la prairie.

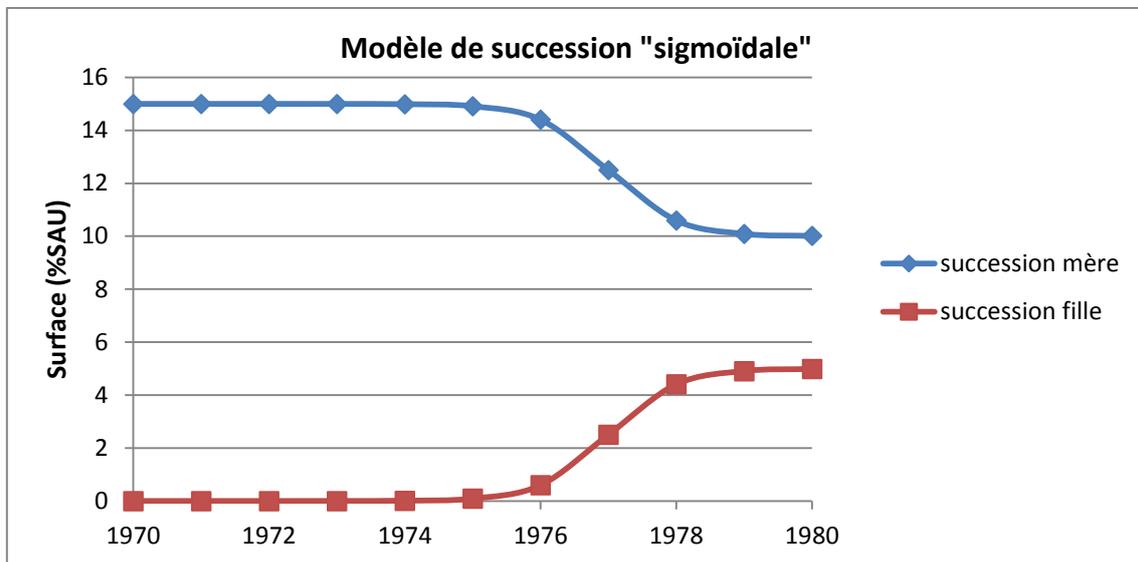


Paramètres :	<p>t : année, t_0 : année initiale (début de période), t_n : année finale (fin de période)</p> <p>soit $0 \leq i \leq n$</p> <p>$S(t)$: surface l'année t (exprimée en fréquence de SAU)</p> <p>S_{max} : fréquence maximale réalisée l'année pour $t=t_n$ (en % de SAU par an)</p> <p>α : taux de transformation (en % de SAU sur la période)</p> <p>π : nombre de cultures dans la succession de transition</p>
Equation de la succession mère	<p>Si $i < n - \pi$</p> $S(t) = S(t_0) - i \times \frac{\alpha}{n - \pi}$ <p>Si $i \geq n - \pi$</p> $S(t) = S(t_0) - \alpha$
Equation de la succession fille	<p>Si $i < \pi$</p> $S(t) = S(t_0)$ <p>Si $i \geq \pi$</p> $S(t) = S(t_0) + i \times \frac{\alpha}{n - \pi}$
Equation de la succession de transition	<p>Si $i = 0$ ou $i = n$</p> $S(t) = 0$ <p>Si $i < \pi$ ou $i > n - \pi$</p> $S(t) = i \times \frac{\alpha}{n - \pi}$ <p>Sinon</p> $S(t) = \frac{\alpha}{n - \pi}$

Figure 6 : modèle de successions « transformation linéaire de A en B »

- **Evolution sigmoïdale** : Ce modèle a été mis en place pour représenter une évolution par paliers.

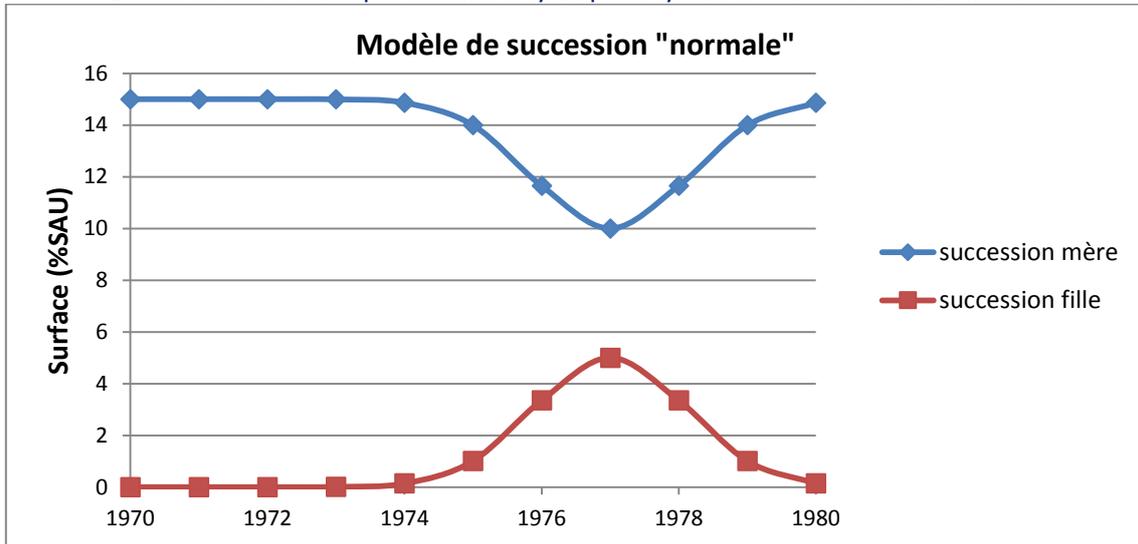
Dans l'exemple de la Figure 7, 5% de la succession bleue est remplacée par la succession rouge. Ce modèle a été très utilisé pour représenter certaines évolutions de pratiques au sein de périodes homogènes (par exemple la mise en place de CIPAN au début des années 2010).



Paramètres :	<p>t : année, t_0 : année initiale (début de période), t_n : année finale (fin de période)</p> <p>soit $0 \leq i \leq n$</p> <p>$S(t)$: surface l'année t (exprimée en fréquence de SAU)</p> <p>S_{max} : fréquence maximale réalisée l'année pour $t=t_n$ (en % de SAU par an)</p> <p>t_m : Année où $S(t) = \frac{S(t_n)}{2}$</p> <p>β : paramètre de vitesse d'évolution</p>
Equation de la succession mère	$S(t) = S(t_0) - \frac{S(t_n)}{(1 + e^{(-1 \times \beta \times (t_0 + i - 1 - t_m))})}$
Equation de la succession fille	$S(t) = \frac{S(t_n)}{(1 + e^{(-1 \times \beta \times (t_0 + i - 1 - t_m))})}$

Figure 7 : modèle de successions « sigmoïdale »

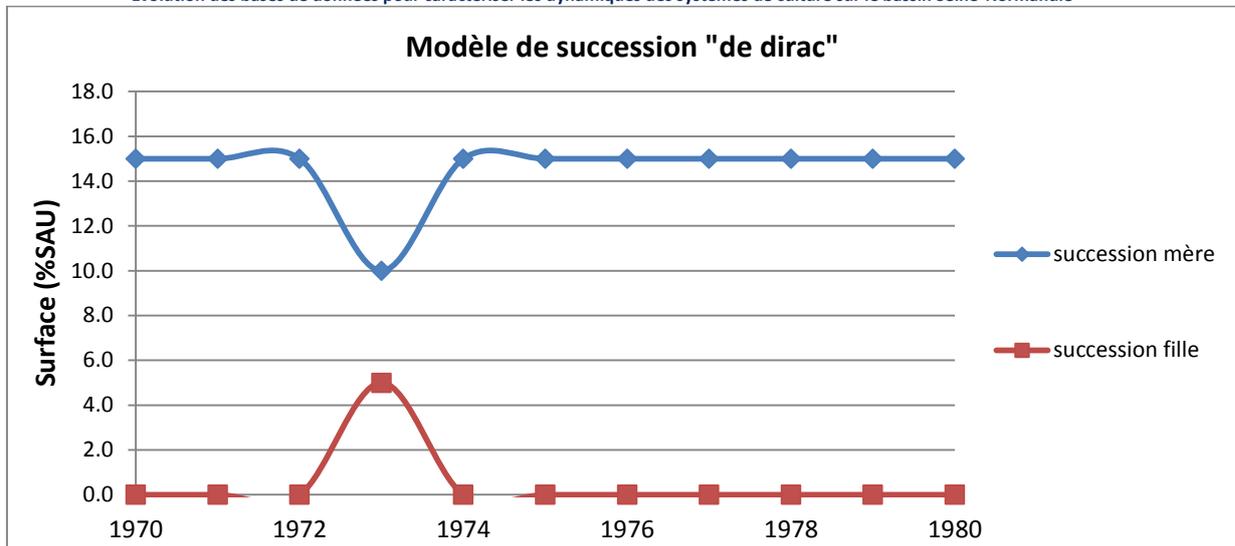
- Evolution **normale** : Ce modèle a été mis en place pour représenter des phénomènes éphémères d'apparition puis de disparition d'une culture au sein d'une période homogène. Il a été très utilisé pour représenter les dynamiques pluriannuelles comme celles du pois, du tournesol ou des jachères. Par exemple sur la Figure 8, la succession bleue est remplacée par la succession rouge dont le maximum est de 5% atteint en 1977.



Paramètres :	<p>t : année, t_0 : année initiale (début de période), t_n : année finale (fin de période)</p> <p>soit $0 \leq i \leq n$</p> <p>$S(t)$: surface l'année t (exprimée en fréquence de SAU)</p> <p>μ : paramètre de vitesse d'évolution</p>
Equation de la succession mère	$S(t) = S(t_0) - e^{-\frac{(t-t_n)^2}{S(t_n)} \times \mu} \times S(t_n)$
Equation de la succession fille	$S(t) = e^{-\frac{(t-t_n)^2}{S(t_n)} \times \mu} \times S(t_n)$

Figure 8 : modèle de successions « normale »

- Evolution de dirac : Ce modèle a été mis en place pour représenter un phénomène exceptionnel et ponctuel (gelées). Dans l'exemple de la Figure 9, la succession mère représente toujours 15% de la SAU, sauf en 1973 où sa valeur chute à 10%. Cette année-là seulement, la succession fille représentée en rouge est non nulle et égale à 5%. Ce cas peut être considéré comme un cas exceptionnel du modèle « normale ».



Paramètres :	<p>t : année, t_0 : année initiale (début de période), t_n : année finale (fin de période)</p> <p>soit $0 \leq i \leq n$</p> <p>$S(t)$: surface l'année t (exprimée en fréquence de SAU)</p> <p>t_m : Année du phénomène</p>
Equation de la succession mère	<p>Si $t = t_m$: $S(t) = S(t_0) - S(t_m)$</p> <p>Sinon $S(t) = S(t_0)$</p>
Equation de la succession fille	<p>Si $t = t_m$: $S(t) = S(t_m)$</p> <p>Sinon $S(t) = 0$</p>

Figure 9 : modèle de successions « de Dirac »

Les cas présentés ci-dessus sont des cas élémentaires qui peuvent être combinés entre eux.

La structure du module permet :

- d'avoir plusieurs successions mères par succession fille
- d'avoir plusieurs successions filles par succession mère
- de combiner plusieurs modèles pour une même succession
- d'ajuster les paramètres d'intensité et durée du phénomène représenté, de date de début et date de fin, vitesse d'évolution (pour atteindre l'équilibre), ..., les paramètres et leur nombre étant dépendants du modèle choisi.

2.4 Résultats

2.4.1 L'exemple dans le Drouais – Thimerais (UMA 152)

Dans ce chapitre, nous mettons en application la méthode proposée pour modéliser l'évolution des assolements des céréales et des principales têtes de rotation sur l'UMA 152.

Dans la partie 2.1, nous avons illustré d'une part l'évolution des surfaces des principales cultures dans le département d'Eure-et-Loir (Figure 3) et d'autre part les assolements des mêmes cultures tels que représentés dans les bases de données historiques (Figure 2) sur cette même UMA.

A partir de la méthode proposée, nous estimons les valeurs annuelles des assolements de chaque culture de l'UMA 152 dans les Figure 10 et Figure 11.

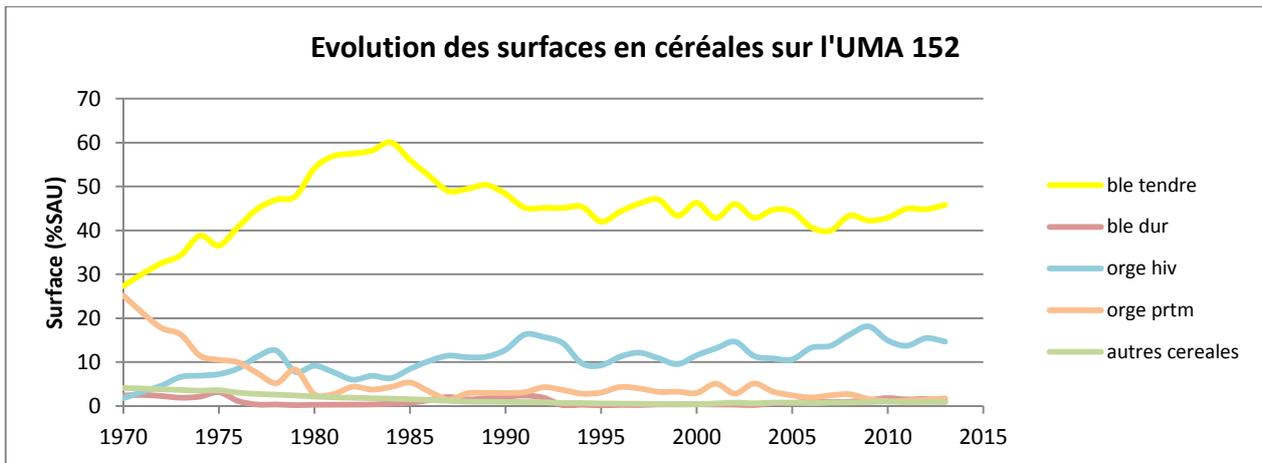


Figure 10 : Evolution des fréquences estimées des céréales sur l'UMA 152

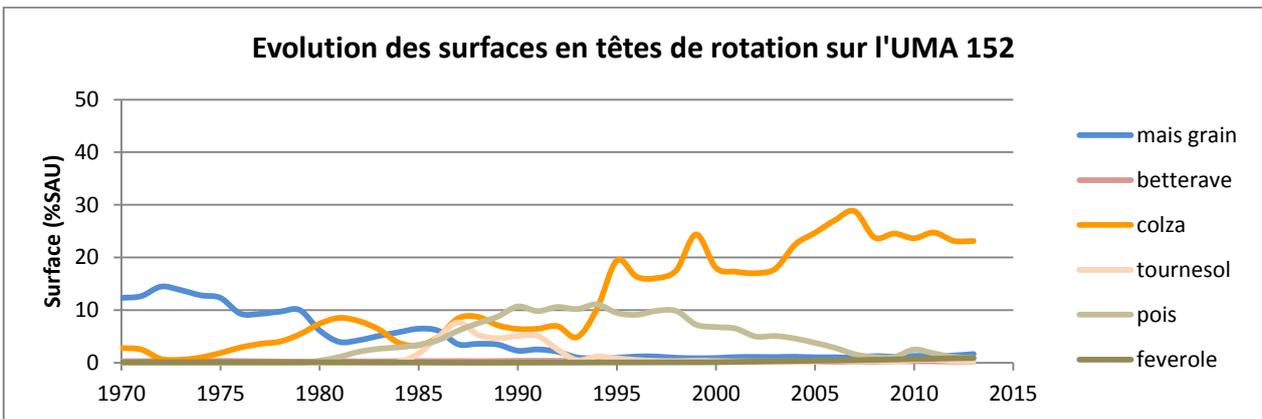


Figure 11 : Evolution des fréquences estimées des principales têtes de rotation sur l'UMA 152

Ainsi, on mobilise les différents modèles de successions pour annualiser la fréquence des successions ARSEINE et reproduire une évolution temporellement continue des assolements (représentés sous la forme des petits cercles de couleur sur les Figure 12 et Figure 13).

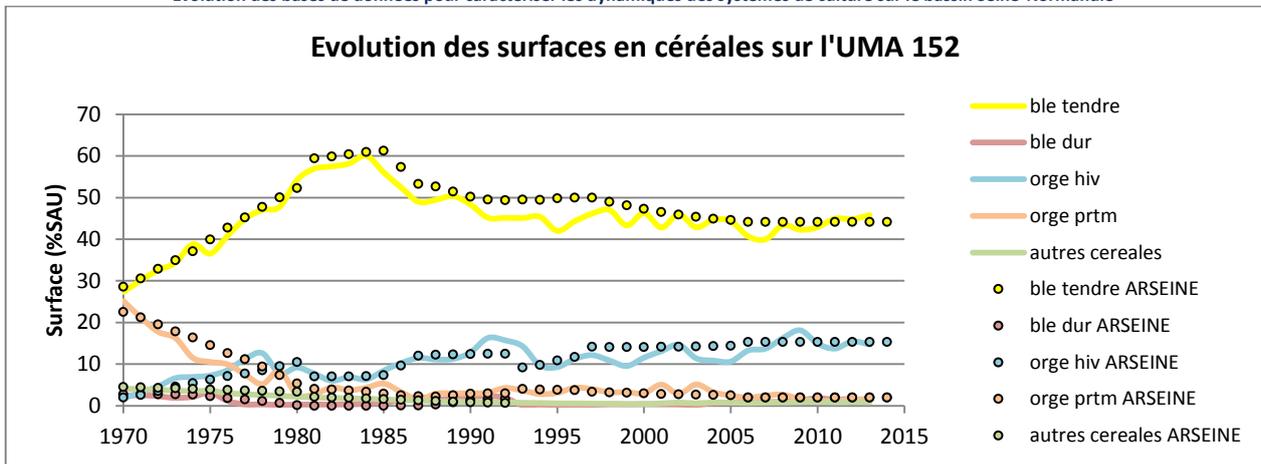


Figure 12 : Evolution des assolements en céréales reconstitués sur l'UMA 152 dans la base de données ARSEINE

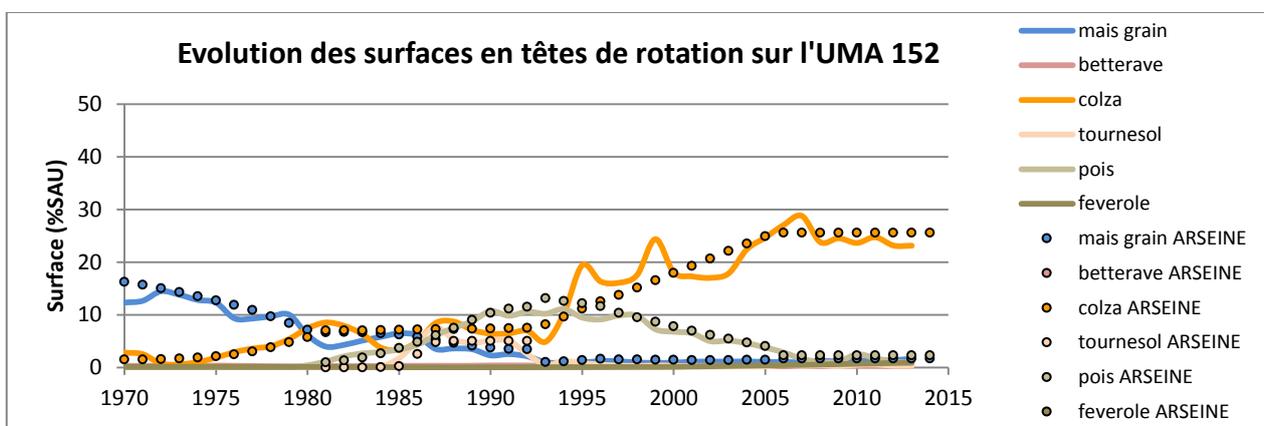


Figure 13 : Evolution des assolements des principales têtes de rotation reconstitués sur l'UMA 152 dans la base de données ARSEINE

De cette manière, on représente dans ARSEINE, à partir d'un assolement de successions de cultures, les évolutions interannuelles des assolements de chaque UMA du bassin Seine-Normandie.

2.4.2 Evolution des assolements des UMA du bassin Seine-Normandie

- Représentation des assolements dans les bases de données

L'ensemble des UMA du bassin a fait l'objet d'un ajustement de la fréquence des successions de cultures tel que décrit dans la chapitre précédent. Le Tableau 1 présente, pour les principales cultures présentes sur le bassin Seine Normandie, l'écart observé entre l'assolement estimé (trait continu des Figure 12 et Figure 13 dans le cas de l'UMA 152) et l'assolement représenté dans les bases de données (symboles ponctuels des Figure 12 et Figure 13 dans le cas de l'UMA 152). Le Tableau 1 présente également, l'écart équivalent calculé sur le même grain spatial par projection des bases de données utilisées jusqu'alors avec la base de données bassin de la Seine (1970-2006), la base de données bocage normand (1970-2009) et l'ensemble du bassin Seine-Normandie sur la période récente (ARSEINE 2.2 2006-2014).

Si le gain de précision reste modeste sur les cultures annuelles, il est significatif sur les prairies permanentes dont l'écart moyen absolu entre la valeur estimée et la valeur représentée dans les bases

de données passe de 7% de la SAU (dans les versions antérieures) à moins de 1% dans la base de données actualisée.

Il faut cependant rester vigilant dans la mesure où les valeurs d'écart moyen peuvent cacher de fortes hétérogénéités, en particulier dans le cas de cultures volatiles (maïs grain, colza).

Finalement, si la représentation de l'évolution des assolements de chacune des 95 UMA n'a pas de place dans un rapport de synthèse, il reste intéressant de représenter l'évolution globale des assolements tels que reconstitués dans la base de données. La Figure 14 représente, à l'échelle de l'ensemble du bassin Seine-Normandie, les évolutions d'assolements tels que représentés dans ARSEINE et utilisé pour les modélisations de phénomènes environnementaux réalisés par Gallois et Viennot (Gallois et Viennot, 2018). Une description plus détaillée des assolements par Grande Région Agricole est présente en Annexe 3. Une description des assolements par UMA est disponible dans les tableaux numériques fournis avec ce rapport et représentés sous forme cartographique dans l'Annexe 2.

Ce travail d'homogénéisation des bases de données apporte une valeur ajoutée à la description des systèmes de culture notamment dans la perspective de valorisation du contenu de la base de données dans des procédures de modélisation des transferts d'azote vers les eaux souterraines : ce mode de représentation permet de rendre compte notamment des dynamiques de retournement des prairies permanentes dont les conséquences en termes de flux d'azote peuvent être importants et qu'il est utile de représenter dans les bases de données situées en amont des modélisations environnementales.

- Evolution des assolements sur le bassin Seine-Normandie

Globalement sur le bassin, les prairies permanentes ont nettement régressé, passant de plus de 35% de la SAU au début des années 1970 à moins de 20% au milieu des années 2000. La vitesse de retournement des prairies s'est ralenti dès le milieu des années 2000.

La décennie 1970 est marquée par une progression de plus de 50% des surfaces en blé tendre. Le maïs fourrage s'impose progressivement comme culture fourragère au détriment des prairies (permanentes ou artificielles). Durant cette période, l'orge d'hiver devient une des principales cultures du bassin en substitution de l'orge de printemps.

La décennie 1980 se caractérise par une montée en puissance, sous l'impulsion des politiques publiques, du pois, du tournesol et du colza, en remplacement du maïs grain et de l'orge de printemps. Le blé tendre et l'orge d'hiver restent stables sur la période. Le maïs fourrage poursuit sa progression observée depuis 1970.

Les années 1990 sont marquées par les réformes successives de la politique agricole commune avec l'instauration des jachères. Dans un premier temps (1992-1997), les surfaces en jachères (généralement sous forme de sol nu) sont intégrées dans la rotation (jachères rotationnelles), puis deviennent fixes. L'arrivée de la jachère marque le début de déclin des surfaces en pois. Cette période marque aussi l'essor du colza, qui devient la deuxième culture annuelle du bassin. au début de la période, l'orge de printemps et le maïs grain sont à leur minimum observé des quarante dernières années.

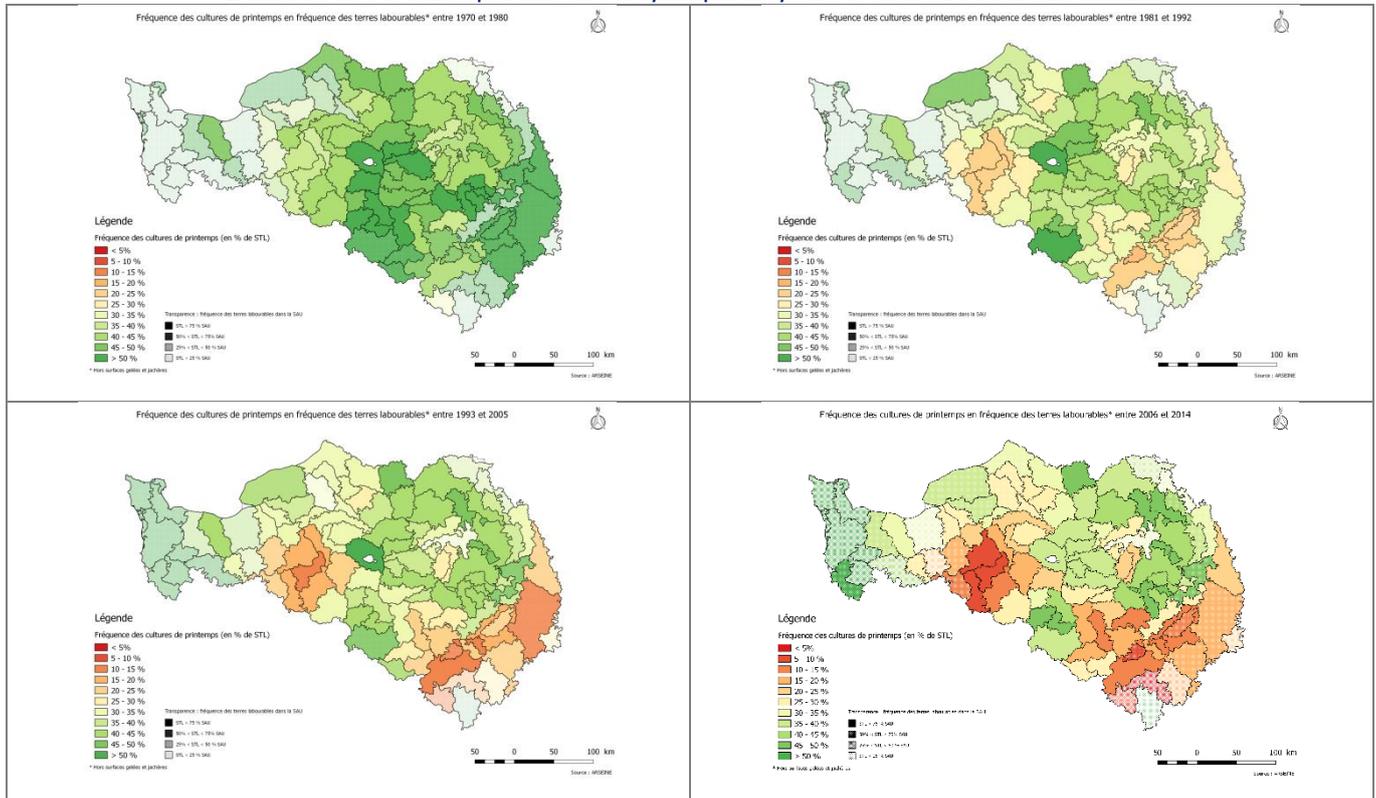
Le colza continue sa progression jusqu'au milieu des années 2000. Depuis cette date, les surfaces sont relativement constantes voire en légère diminution. Le pois poursuit son déclin amorcé en 1992 malgré certains plans de relance (plan Barnier, 2010). Les surfaces en maïs fourrage restent relativement stables depuis la fin des années 1990.

- Evolution de la diversité des assolements sur le bassin Seine-Normandie

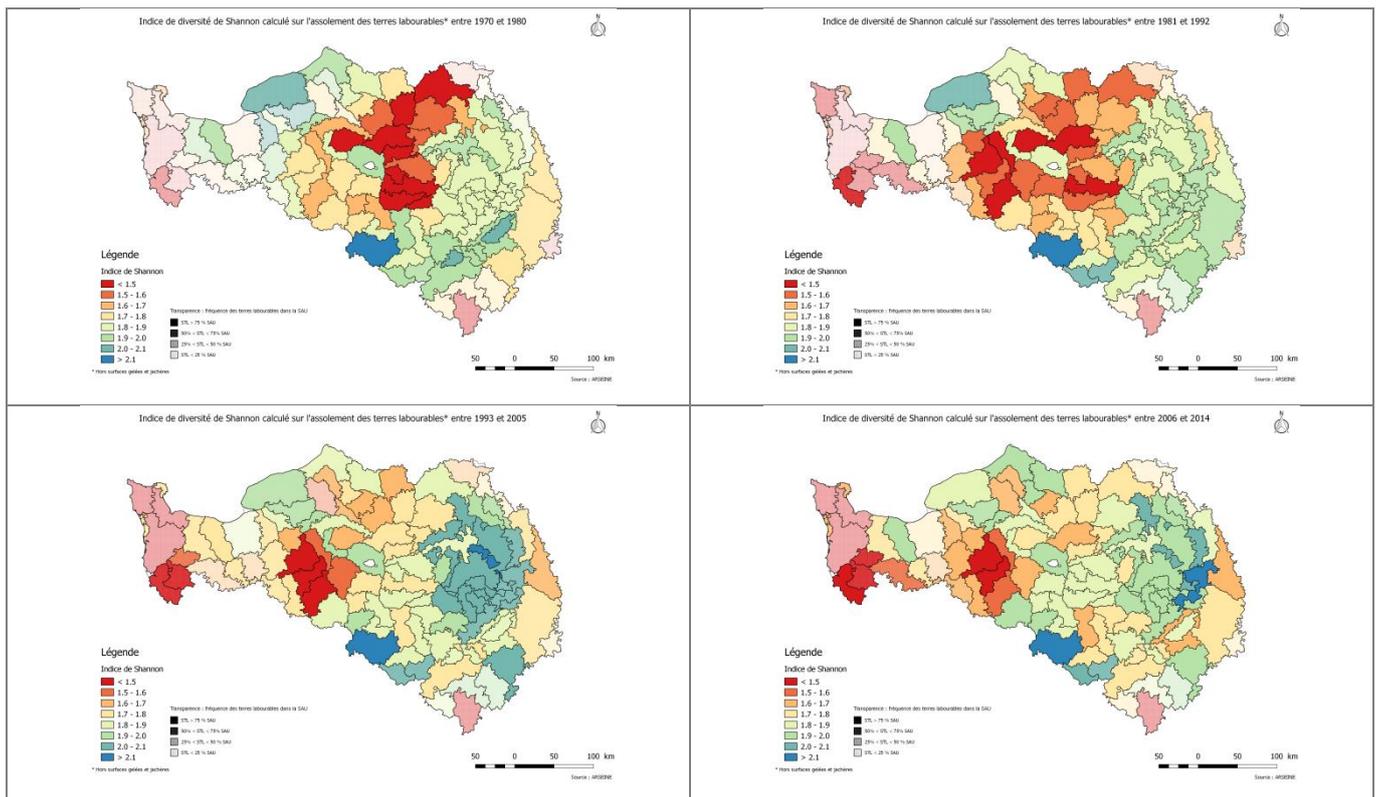
La Carte 7 met en avant une réduction de la fréquence des cultures de printemps en particulier dans les départements du Sud-ouest du bassin (Eure et Eure-et-Loir) ainsi qu'à l'Est du bassin (Meuse, Haute-Marne, Yonne). Dans ces régions, les cultures de printemps représentent actuellement moins de 20% des surfaces labourables (voire même localement moins de 10%) alors qu'elles représentaient plus de 40% des surfaces dans les années 1970. Cette réduction résulte d'une diminution dans les années 1980 et 1990 de l'orge de printemps et du maïs grain puis du pois et dans une moindre mesure du tournesol dans les années 2000 et 2010 au profit des céréales d'hiver (blé tendre, orge d'hiver et escourgeon) et du colza. Seules la Normandie (maïs), la Picardie et la Champagne (orge de printemps, betterave) conservent une proportion de cultures de printemps supérieures à 35%.

Par ailleurs, la Carte 8 présente l'évolution de la diversité des assolements⁶ sur le bassin de la Seine. Elle met en évidence une diminution de la diversité des assolements dans le Sud-Ouest du bassin parisien (Eure, Eure-et-Loir) et une relative bonne diversité en Champagne et en Picardie, dû notamment à la présence de betterave (Picardie & Champagne) et de luzerne (Champagne) dans les assolements. Inversement, les assolements bas-normands sont peu diversifiés du fait de les seuls maïs fourrage, blé tendre et prairies temporaires représentent plus de 90% des surfaces labourables.

⁶ Calculé sur les terres labourables, excluant les surfaces gelées et les jachères.



Carte 7 : Evolution de la fréquence de cultures de printemps sur le Seine-Normandie entre 1970 et 2014



Carte 8 : Evolution de la diversité des assolements des UMA du bassin Seine-Normandie entre 1970 et 2014

Encadré : Mesurer une diversité à partir de l'indice de Shannon

L'indice de Shannon est un indicateur couramment utilisé pour représenter la diversité dans certaines disciplines et notamment l'écologie (Shannon et Weaver, 1949). Nous remobilisons cet indicateur pour caractériser la diversité des assolements des terres labourables (hors jachères et surfaces gelées).

L'indice de diversité de Shannon est défini tel que $H_{(UMA,Année)}^{assolement} = - \sum_{i=1}^n p_i * \ln(p_i)$ avec p_i la part de la culture i dans la sole de l'UMA considérée une année donnée et n le nombre de cultures observées.

	Nombre de valeurs	Ecart absolu moyen entre l'assolement estimé et l'assolement « ARSEINE » (en % de SAU)	
		$\frac{\sum_{\text{toutes les années représentées}} (sole\ estimée) - (sole\ ARSEINE) }{\text{Nombre d'années représentées}}$	
		Bases de données antérieures ⁷	Version « améliorée » ⁸
Blé tendre	4180	4.3	1.8
Orge d'hiver	4180	3.4	1.0
Orge de printemps	4180	3.1	1.1
Maïs grain	4180	2.1	0.9
Maïs fourrage	4180	1.3	0.7
Betterave	4180	1.4	0.5
Colza	4180	1.9	1.1
Tournesol	4180	0.5	0.3
Pois	4180	1.5	0.6
Luzerne	4180	1.4	0.6
Prairies temporaires	4180	1.4	0.8
Prairies permanentes	4180	7.1	0.8
Pommes de terre	4180	0.5	0.3
Vignes	4180	0.5	0.1
Jachères	4180	0.8	0.5
Toutes cultures	104500	1.5	0.5

Tableau 1 : différences moyennes entre assolement estimé à partir des statistiques agricoles et assolement représenté par la base de données ARSEINE

Dans sa version antérieure et dans sa version actualisée i.e. intégrant une évolution intra-période de la fréquence des successions de cultures.

Notes :

- la valeur de 4180 est issue du nombre de différences comptabilisées pour chaque culture (44 années par UMA (1970-2014) pour 95 UMA)
- la valeur de 104500 est issue du nombre de différences toutes cultures confondues (25 cultures, 44 années, 95 UMA)

⁷ Bases de données décrites dans le premier item du chapitre 21.

⁸ Correspondant à la version ARSEINE 3.4.2.

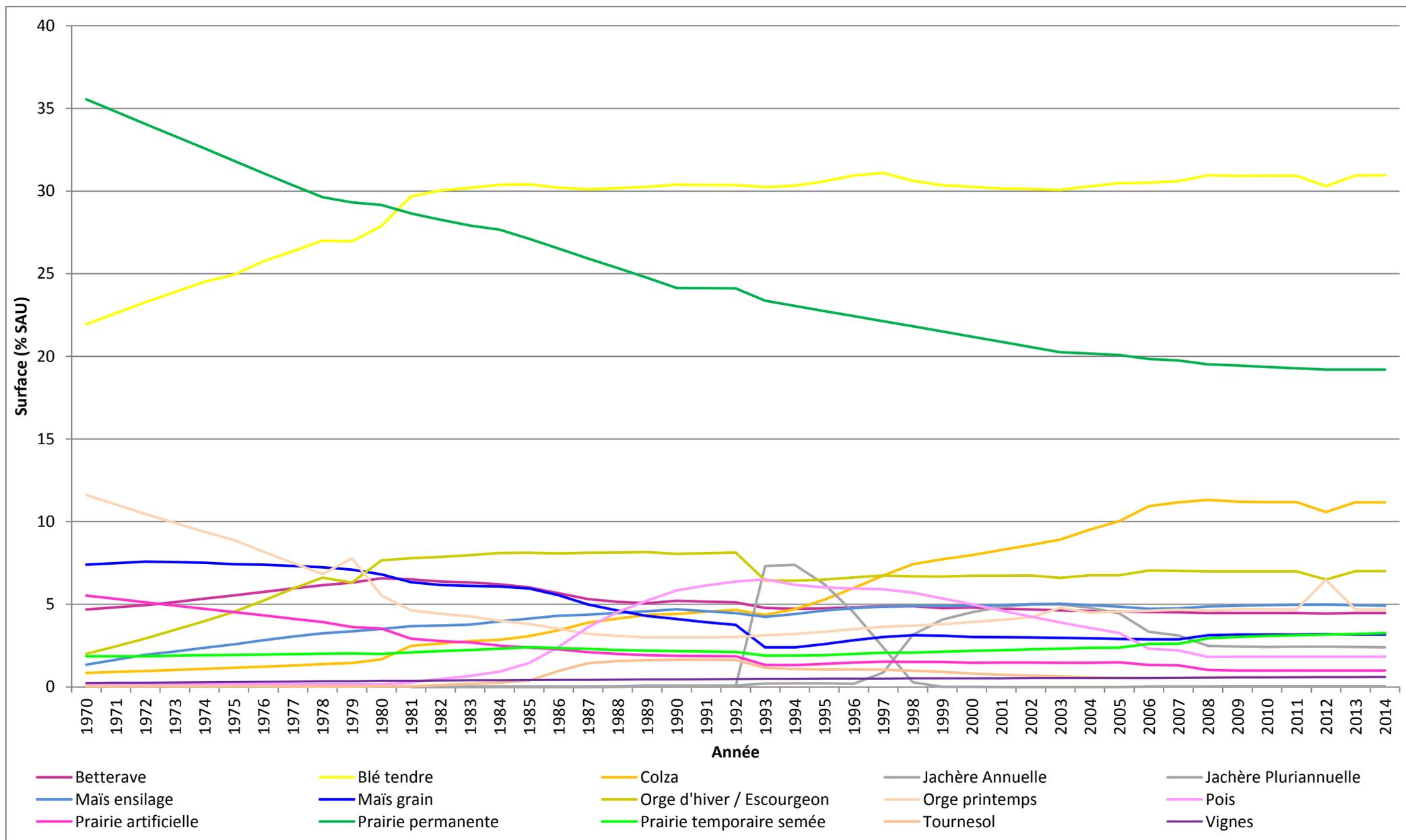


Figure 14 : Evolution des assolements des principales cultures sur le bassin Seine-Normandie (source ARSEINE)

2.4.3 Evolution des pratiques agricoles

La structuration de données des successions culturales telle que proposée dans le chapitre 2.3, permet d'annualiser la fréquence des successions de cultures. Or, dans le modèle de base de données ARSEINE, les successions de cultures sont le support de représentation des systèmes de culture et par conséquent le support des évolutions de pratiques agricoles (fertilisation, travail du sol, gestion des intercultures ou irrigation). Au même titre que l'on peut représenter des évolutions d'assolement, on peut représenter des évolutions de pratiques repérées à partir des statistiques et des enquêtes auprès des acteurs de la profession agricole.

Les paragraphes suivants illustrent des valorisations possibles du contenu d'ARSEINE à l'échelle du bassin sur le temps long. De la même façon que cela avait été représenté par Puech et al (2015), l'Annexe 2 représente une cartographie de l'évolution des principales pratiques agricoles sur le bassin Seine-Normandie de 1970 à 2014. Les pratiques moyennes sont représentées sur la base de périodes temporelles jugées relativement homogènes du point de vue des pratiques par les acteurs de la profession agricole enquêtés (1970-1980, 1981-1992, 1993-2005, 2006-2014).

Si ces indicateurs donnent à voir une diversité de pratiques et leurs évolutions, ils ne représentent pas l'exhaustivité des indicateurs présents dans ARSEINE, plus complexes à représenter. L'Annexe 1 présente la procédure à réaliser (et les erreurs à éviter) pour valoriser les données d'ARSEINE sous forme d'indicateurs.

- Evolution de la fertilisation azotée minérale totale sur grandes cultures

A partir du contenu d'ARSEINE, il est possible de représenter les évolutions de pratiques de fertilisation azotée minérale sur le bassin. Ainsi, la Figure 15 représente l'évolution pour les principales cultures des apports d'azote minéral⁹.

La fertilisation des céréales à pailles a globalement augmentée jusqu'au début des années 90 puis s'est stabilisée (orge d'hiver, blé dur) ou a légèrement diminué (blé tendre), à l'exception de l'orge de printemps dont la fertilisation a continué d'augmenter mais à des rythmes inférieurs aux évolutions des décennies 1970 et 1980. La fertilisation du maïs grain suit les mêmes tendances que celle du blé tendre. Enfin, la fertilisation du maïs fourrage, de la betterave et du tournesol ont diminué progressivement de 1970 au début des années 2000, bien que l'origine des baisses soit différente selon les cultures (prise en

⁹ A l'exclusion des apports d'azote minéral sur les résidus de culture, pratique rencontrée dans les années 1970 et au début des années 1980.

compte de l'azote des apports organiques pour le maïs fourrage, contraintes industrielles d'extrahibilité du sucre pour la betterave...).

Bien que l'évolution de la structuration des données améliore la représentation de l'évolution temporelle d'indicateurs comme celui représenté ci-dessous, certaines transitions entre périodes homogènes s'accompagnent d'évolution discontinues sous formes de transitions par plateaux.

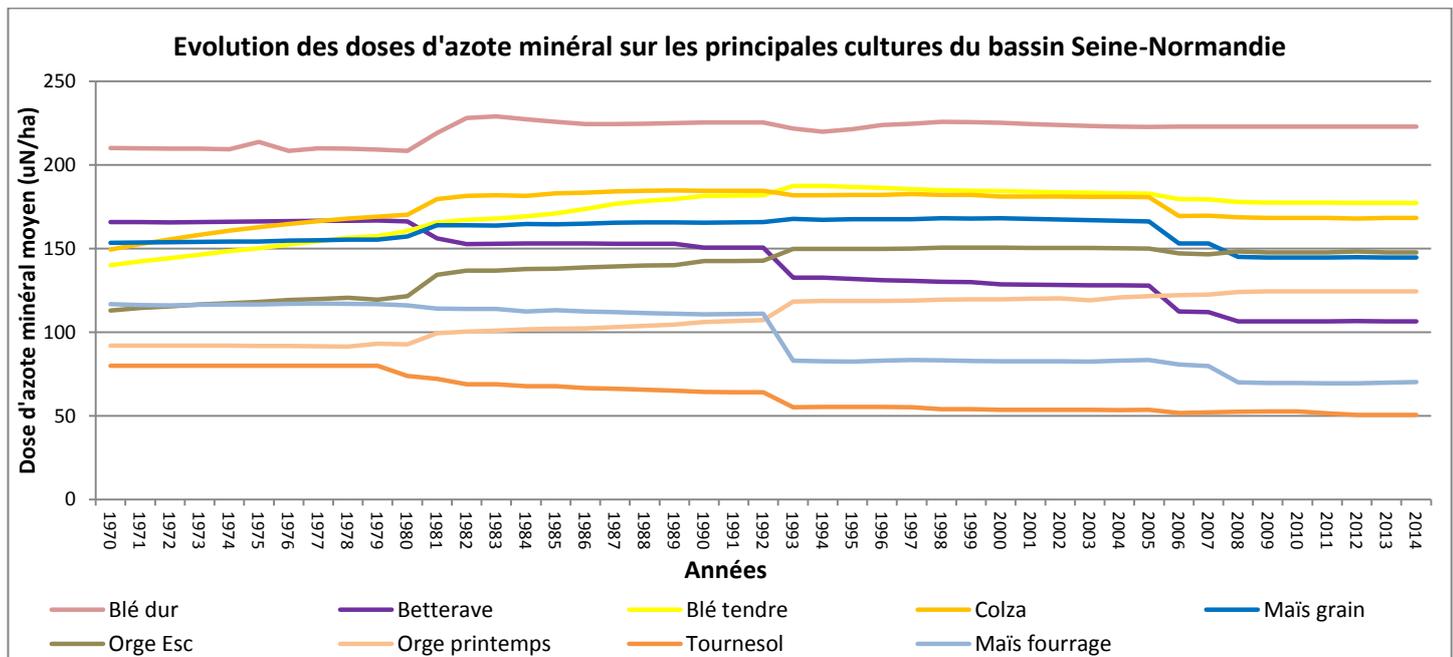
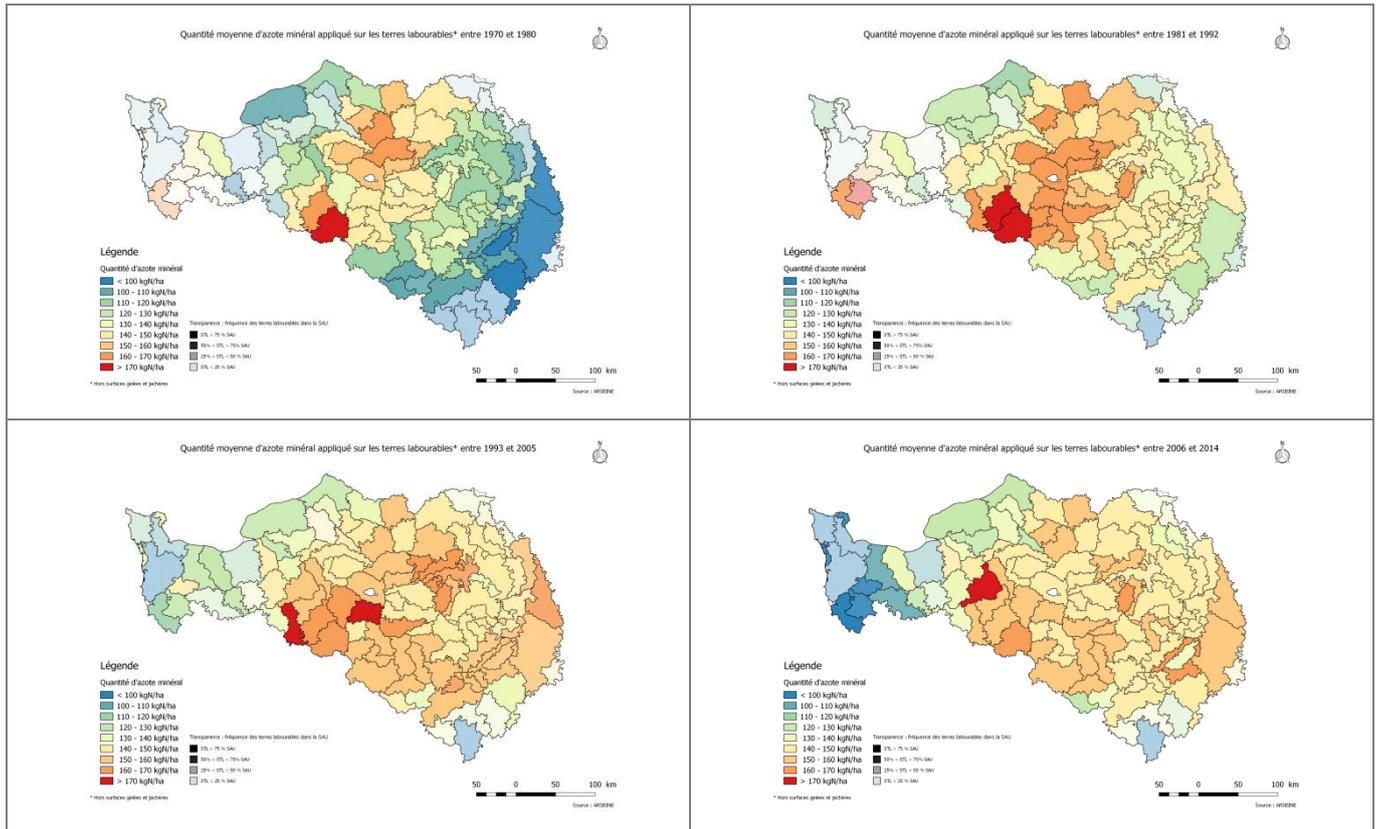


Figure 15 : Evolution de la fertilisation azotée minérale moyenne des principales cultures annuelles du bassin Seine-Normandie (source ARSEINE)

La Carte 9 présente l'évolution des quantités moyennes d'azote minérales appliquées sur les terres labourables⁹. Elle met en avant une augmentation significative des doses moyennes entre les décennies 1970 et 1980 puis une stagnation dans les années 1990 et une légère diminution dans les années 2000 puis 2010 malgré la diminution de la place des protéagineux dans les assolements du bassin. Ces dynamiques cachent de fortes hétérogénéités entre cultures (Figure 15) et entre régions (Annexe 2).



Carte 9 : Evolution de la quantité d'azote minérale moyenne épandue sur le bassin Seine-Normandie entre 1970 et 2014

- Evolution des pratiques de travail du sol (labour)

De même que précédemment, on peut suivre l'évolution des pratiques de travail du sol avant l'implantation des principales cultures annuelles. Si le labour fut, jusqu'au début des années 1990, une pratique quasiment systématique (plus de 9ha sur 10 étaient labourés), il est en régression depuis avec le développement des techniques sans labour notamment dans les grandes exploitation de l'Est du bassin, en particulier sur les cultures d'hiver (colza, blé tendre, orge d'hiver). Environ ¾ des terres arables du bassin restent labourées dans les années 2010 où des cultures comme la pomme de terre, le maïs et la betterave sont quasi-systématiquement labourées (Figure 16).

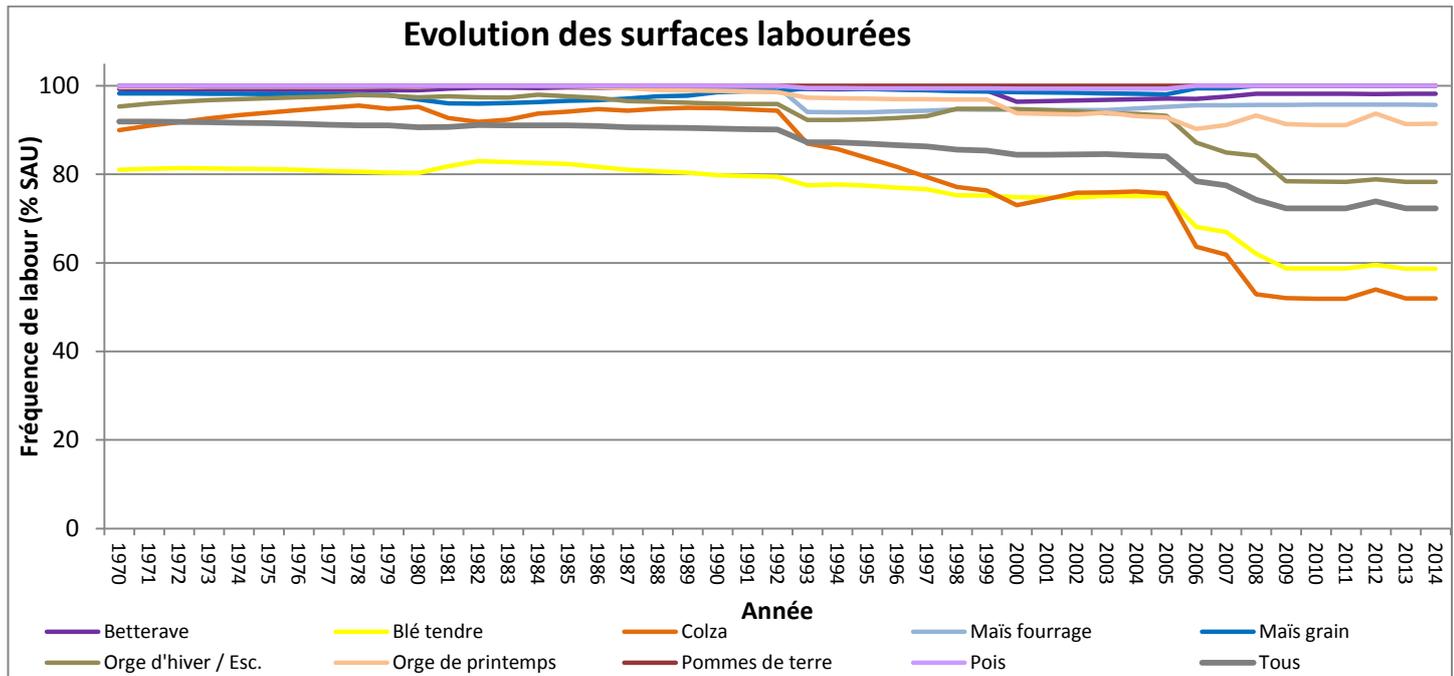


Figure 16 : Evolution des surfaces labourées des principales cultures annuelles du bassin Seine-Normandie (source ARSEINE)

- Evolution de la couverture des sols avant cultures de printemps

Rendue obligatoire en 2012 sur les zones vulnérables nitrates (soit environ 90% du bassin), l'implantation de couverts intermédiaires avant cultures de printemps a suivi une forte progression à partir du milieu des années 2000 (Figure 17¹⁰). L'implantation de couverts intermédiaires avant betteraves s'est développé dès les années 1970. A noter également qu'un faible pourcentage des surfaces cultivées en maïs fourrage bénéficient d'un couvert intermédiaire (généralement sous la forme de dérobées fourragères jusque dans les années 2000).

¹⁰ Les moyennes sont réalisées sur les surfaces concernées par la réglementation (notamment au regard de la date de récolte du précédent cultural).

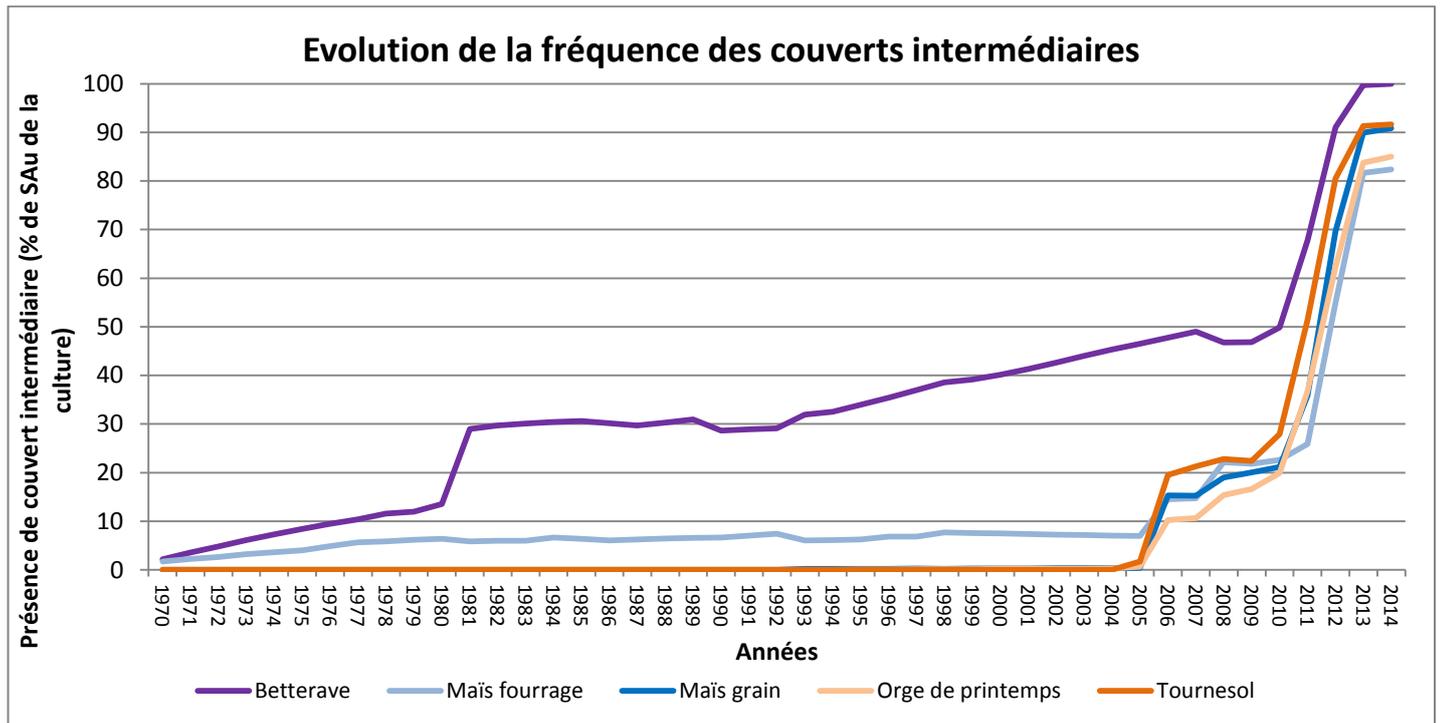


Figure 17 : Evolution des surfaces concernées par l'implantation de couverts intermédiaires avant les principales cultures de printemps du bassin Seine-Normandie (source ARSEINE)

- L'utilisation des effluents organiques des élevages du bassin

Le paragraphe 6.3 du rapport méthodologique de conception de la base de données ARSEINE (Puech et al, 2015) présente une méthode de vérification de la cohérence entre azote produit par les activités d'élevage et azote restitué (sous forme d'épandages de fertilisants type fumiers, lisiers, etc, ou de restitution au pâturage). La méthode a été reproduite pour valider la cohérence des bilans d'azote organiques par UMA via la valorisation des données d'effectifs animaux des recensements agricoles 1970 à 2010.

Le Tableau 2 présente l'évolution par GRA du bilan (azote organique restitué sous la forme de fumure épandue ou restituée au pâturage - azote organique produit par les activités d'élevage). Globalement la différence entre « azote organique produit par les activités d'élevage » (estimation à partir des effectifs animaux issus des recensements agricoles) et « azote organique restitué » tel que référencé dans ARSEINE (et in finé utilisé pour la modélisation) est inférieure à 6 kg N organique/ha/an (et en moyenne inférieure à 2kgN/ha/an). Compte tenu des nombreuses hypothèses réalisées pour ce calcul (voir Puech et al, 2015, chapitre 6.3, pages 83 à 87), on considèrera que les différences sont tout à fait satisfaisantes.

GRA	1970	1979	1988	2000	2010
1	-1	0	-2	-2	-4
2	0	-1	1	-1	-3
3	0	1	1	0	4
4	-2	-3	0	-1	-1
5	-6	0	-1	-3	-1
6	-1	0	-1	-2	1
7	-1	-2	-1	-2	-3
Bassin	-2	-1	-1	-2	-1

Tableau 2 : Tableau de validation des bilans d'apports azotés organiques (exprimé en kg N organique / ha SAU, source AR-SEINE)

2.4.4 Synthèse : la base de données ARSEINE en quelques chiffres

La base de données ARSEINE (dans sa version finalisée 3.4.3) décrit les systèmes de culture de chacune des 95 UMA (Carte 2) sur la période 1970-2014. Les 45 années de caractérisation des pratiques sont découpées en groupes d'années ou périodes homogènes du point de vue des pratiques agricoles. On dénombre entre 4 et 5 périodes homogènes par UMA couvrant¹¹ les périodes 1970-1980, 1981-1992, 1993-2005 et 2006-2014. Au total, ARSEINE regroupe 3.155 itinéraires techniques (24 cultures) d'origine différentes (enquêtes auprès de 123 acteurs de la profession agricole, statistiques agricoles), chacun étant caractérisé par un enchaînement d'opération techniques (fertilisation azotée organique & minérale, travail du sol, interculture et irrigation¹²) et référencé sur les dimensions spatiales (une ou plusieurs UMA) et temporelles (une ou plusieurs périodes homogènes). Ces itinéraires techniques sont distribués sur les 4.576 successions de cultures pour former autant de systèmes de cultures. Ainsi, on recense ainsi en moyenne une quinzaine de systèmes de culture par UMA et par période homogène. Les systèmes ainsi décrits sont structurés et mis à disposition des chaînes de modélisation (Viennot et Gallois, 2017).

2.5 Validation à partir de sources de données

2.5.1 Sources d'informations

Trois bases de données locales ont été mobilisées pour évaluer la validité des systèmes de culture reproduits dans ARSEINE durant les années 2010. Ces bases de données sont issues d'initiatives d'acteurs locaux de recensement non exhaustif des pratiques agricoles sur une ou plusieurs années et dans trois contextes différents :

¹¹ Variable selon les UMA.

¹² Complété des modes respectivement de gestion des prairies (fauche / pâture) et des vignes (taille...) pour respectivement les prairies permanentes, temporaires, luzerne et les vignes.

- Un contexte de polyculture-élevage dans l'Ouest du bassin (UMA 281 et 195)¹³. La base de validation est constituée d'enquêtes parcellaires fournies par la DT Seine-Aval de l'AESN.
- Un contexte de cultures céréalières et d'oléo-protéagineux au centre du bassin parisien (UMA 361). La base de validation recense des enquêtes parcellaires conduites par l'INRA-SAD-ASTER à la fin des années 2000 – début des années 2010.
- Un contexte de grandes cultures sur l'UMA 152. La base de validation est constituée d'enquêtes parcellaires fournies par la DT Seine-Aval de l'AESN.

L'ensemble des bases de données citées précédemment sont considérées indépendantes des sources d'information utilisées pour la construction d'ARSEINE (enquêtes pratiques culturales, entretiens avec des acteurs du conseil agricole) puisqu'elles ont été conduites directement en exploitations. Cette indépendance reste relative dans la mesure où le conseil apporté aux agriculteurs (au moins pour partie d'entre eux) a vraisemblablement été apporté via les structures enquêtées pour la construction de la base de données (chambres d'agriculture, organismes privés).

2.5.2 Indicateurs de comparaison

Pour comparer les données ARSEINE avec les données issues d'enquêtes parcellaires, nous avons identifié 5 indicateurs par culture :

- La fertilisation minérale azotée totale (kgN/ha/an)
- La fréquence d'apport de fumure organique (en % de SAU)
- Le rendement (en quintaux/ha)¹⁴
- La fréquence de labour (en % de SAU)
- La date de semis (exprimée en jour julien¹⁵)

Les enquêtes réalisées auprès des acteurs de la profession agricole dans le cadre du travail conduit par Puech et al, 2015 mettent en évidence un intervalle de variabilité / d'incertitude des pratiques agricoles, liées à l'adaptation des pratiques (fertilisation notamment) au regard par exemple des variations de conditions climatiques entre les années. Lors des enquêtes conduites, il ressort qu'une variation de moins de 10kgN/ha ou moins de 10j sur la date de semis ne constituent pas de variation significative des pratiques moyennes. Nous considérons également qu'une variation de 10% ou moins sur les fréquences de labour ou d'apports de fumure organique est peu significative.

¹³ Les 2 UMA ont été regroupées afin d'avoir un nombre suffisant d'enquêtes parcellaires de validation.

¹⁴ Bien que cet indicateur ne soit pas structurant dans la méthode de caractérisation des itinéraires techniques dans la méthode proposée par Puech et al, 2015

¹⁵ Sur une base de 365j par an

2.5.3 Validité des pratiques ARSEINE

Le Tableau 3 présente les résultats de la comparaison entre les indicateurs calculés à partir de la base de données ARSEINE et les mêmes indicateurs issus de l'analyse des bases de données parcellaires. Dans la majorité des cas, les indicateurs présentent les mêmes ordres de grandeur (dans l'intervalle de variabilité). La fertilisation minérale azotée totale et la date de semis sont systématiquement comprises dans leurs intervalles de variabilité respectifs. La fumure organique semble également globalement bien estimée exceptée dans le cas du maïs fourrage pour la région en polyculture-élevage (légèrement sur-estimée dans ARSEINE). Ce sont les fréquences de labour et les rendements qui présentent le plus de différences : dans 4 cas, la fréquence de labour est sur-estimée (10 à 25%) dans ARSEINE . A l'inverse, dans 3 cas les rendements sont sous-estimés dans ARSEINE par rapport aux données issues des enquêtes parcellaires. Ces différences de rendement peuvent s'expliquer par l'année enquêtée (2015, seule année enquêtée dans les données parcellaires), où les statistiques agricoles indiquent un rendement de 10% supérieur à la moyenne 2005-2015 (période sur laquelle sont calculés les indicateurs issus d'ARSEINE).

AMU	Espèce cultivée	Variable	Valeur moyennées à partir d'ARSEINE	Valeurs moyennées issues des enquêtes	
				Valeur	Effectifs (nb enquêtes complétées)
281 - 195	Blé tendre	Fertilisation azotée minérale moyenne (kgN.ha ⁻¹)	181	190	134
		Fréquence de fumure organique (%)	7	12	
		<i>Rendement (100kg.ha⁻¹)</i>	85	104	
		Fréquence de labour (%)	55	51	181
		Date de semis (jour julien)	293	301	
	Colza	Fertilisation azotée totale (kgN.ha ⁻¹)	171	162	34
		Fréquence de fumure organique (%)	40	43	
		<i>Rendement (100kg.ha⁻¹)</i>	43	44	
		Fréquence de labour (%)	70	53	32
		Date de semis (jour julien)	265	275	
	Maïs fourrage	Fertilisation azotée totale (kgN.ha ⁻¹)	80	71	54
		Fréquence de fumure organique (%)	98	85	
		<i>Rendement (1000kg.ha⁻¹)</i>	16	17	
		Fréquence de labour (%)	98	83	43
		Date de semis	115	Echantillon insuffisant	
361	Blé tendre	Fertilisation azotée minérale moyenne (kgN.ha ⁻¹)	183	181	396
		Fréquence de fumure organique (%)	0	2	
		<i>Rendement (100kg.ha⁻¹)</i>	79	82	170
		Fréquence de labour (%)	34	34	261
		Date de semis (jour julien)	290	286	399
	Maïs grain	Fertilisation azotée minérale moyenne (kgN.ha ⁻¹)	149	146	80
		Fréquence de fumure organique (%)	20	29	
		<i>Rendement (100kg.ha⁻¹)</i>	94	Echantillon insuffisant	
		Date de semis (jour julien)	103	109	35
		Fréquence de labour (%)	100	74	94

152	Blé tendre	Fertilisation azotée minérale moyenne (kgN.ha ⁻¹)	174	175	163
		Fréquence de fumure organique (%)	0	1	
		<i>Rendement (100kg.ha⁻¹)</i>	69	81	
		Fréquence de labour (%)	64	40	
		Date de semis (jour julien)	276	277	
	Colza	Fertilisation azotée minérale moyenne (kgN.ha ⁻¹)	164	154	106
		Fréquence de fumure organique (%)	15	19	
		<i>Rendement (100kg.ha⁻¹)</i>	37	36	
		Fréquence de labour (%)	70	71	
		Date de semis (jour julien)	240	241	
	Orge d'hiver	Fertilisation azotée minérale moyenne (kgN.ha ⁻¹)	142	145	64
		Fréquence de fumure organique (%)	0	0	
		<i>Rendement (100kg.ha⁻¹)</i>	64	78	
		Fréquence de labour (%)	85	90	
		Date de semis (jour julien)	284	276	

Tableau 3 : comparaison des indicateurs issus d'ARSEINE et des enquêtes parcellaires sur 3 régions du bassin Seine-Normandie¹⁶

¹⁶ En rouge sont indiquées les valeurs au-delà de l'intervalle de variabilité.

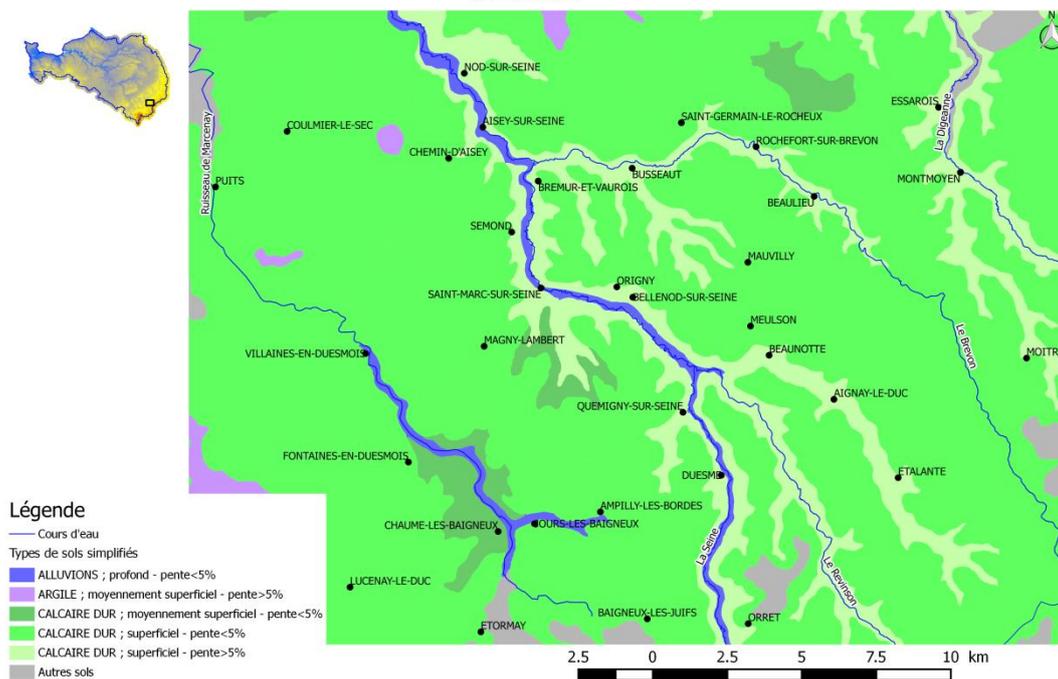
3. Spatialisation des successions de cultures

3.1 Problématique

Durant le projet précédent, le territoire Seine-Normandie a été découpé en 95 unités de modélisation agricole jugées homogènes du point de vue de leurs assolements et sur lesquelles on a fait, pour les besoins de la modélisation, l'hypothèse simplificatrice que les successions de cultures y sont également uniformément réparties. Or, cette hypothèse d'homogénéité que nous savions imparfaite, compte-tenu de l'expérience de terrain des experts rencontrés lors des enquêtes et de nos propres connaissances agronomiques, a pu être invalidée sur certaines territoires à l'aide de nouvelles sources d'informations dont nous ne disposions pas jusqu'à récemment et qui nous permettent à présent de travailler à des échelles spatiales très fines

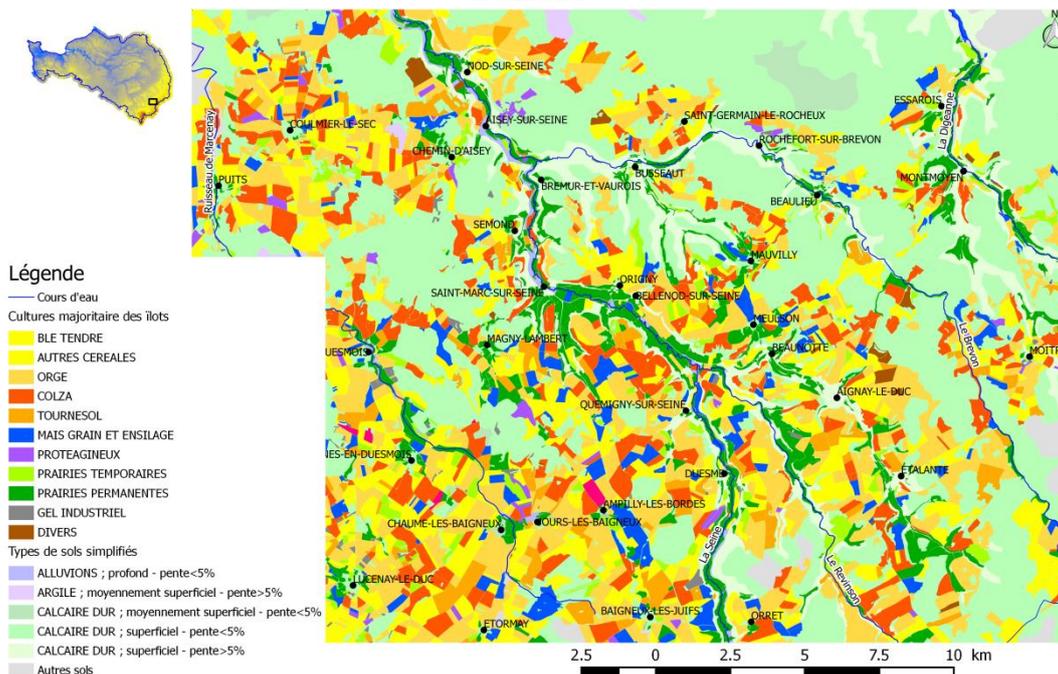
A partir d'un exemple pris dans le Nord du département de Côte d'Or, nous avons mis en évidence que cette hypothèse d'équi-répartition des systèmes de culture par rapports aux types de sols n'est pas systématiquement vérifiée.

Localisation des types de sols simplifiés d'après le Référentiel Régional Pédologique de Côte d'Or



Carte 10 : localisation des types de sols simplifiés sur les plateaux des Barrois en Côte d'Or

Localisation des cultres des îlots RPG 2012 et des types de sols simplifiés d'après le Référentiel Régional Pédologique de Cote d'Or



Carte 11 : localisation des cultures majoritaires des îlots RPG 2012 et des types de sols simplifiés sur les plateaux des Barrois en Côte d'Or

Les Carte 10 et Carte 11 mettent en évidence que les sols alluviaux et les sols de calcaires alluviaux à forte pente marquant la limite entre les plateaux et les vallées, en particulier la vallée de la Seine entre Nod-sur-Seine et Duesme, ont une part de surfaces en herbe qualitativement plus importante que sur les sols calcaires des plateaux voisins.

Or, dans une optique de modélisation des transferts de contaminants vers les eaux, une caractérisation spatialement plus fine des systèmes de culture semble d'un intérêt majeur. Dans cette partie, nous proposons des travaux exploratoires de spatialisation fine des systèmes de culture par rapport aux types de sol. Ces travaux seront réutilisés pour modéliser les flux d'azote à l'échelle des types de sol.

3.2 Données mobilisées

Les données les plus fines spatialement et homogènes pour caractériser les relations entre assolements et types de sols sont d'une part le Registre Parcellaire Graphique (caractérisation et spatialisation occupations du sol) et d'autre part le Référentiel Régional Pédologique (RRP) pour caractériser et localiser les différents types de sols. Or, à l'heure de la réalisation de ces travaux, tous les départements du bassin ne sont pas couverts par le RRP. Les types de sols sont décrits dans la base de données DONESOL (Grolleau et al, 2004). Les propriétés des sols sont définies selon des Unités Typologiques de Sol (UTS), cartographiés au sein d'Unités Cartographiques de Sol (UCS). Chaque UCS contient généralement plusieurs UTS (quantifiées mais non spatialisés au sein des UCS).

3.3 Méthode proposée : spatialisation des occupations du sol au niveau des unités cartographiques de sol

Lors du comité de pilotage du 14 septembre 2016, il a été arrêté que le département d'Eure-et-Loir constitue un terrain d'étude privilégié (mise à disposition de données d'enquêtes par la DT Seine-Aval, secteur de modélisations à affiner).

- Caractérisation des pratiques agricoles à une échelle spatiale fine

Reproduire une nouvelle caractérisation des systèmes de cultures à partir de données finement localisées (i.e. aux types de sol représentés par les Unités Cartographiques de Sol de la base de données DoneSol (INRA, 2016)) représenterait une masse considérable d'informations à collecter (sous réserve de leur disponibilité) et à traiter, d'autant plus si la visée de ce travail est l'ensemble du bassin, et dans une optique de développement méthodologique telle que présentée dans ce travail.

Les systèmes de culture, tels que caractérisés dans la partie 2 ont une validité à l'échelle des UMA et constituent une base solide tant sur le contenu des systèmes de culture, que sur les dynamiques temporelles qu'elles représentent (Etape 1 de la Figure 19). Le choix a donc été fait de repartir de la caractérisation des systèmes à l'échelle des UMA et d'en affiner la(les) localisation(s) préférentielle(s) au regard des types de sols.

La méthode proposée se décline en deux parties

- la première partie consiste à affiner la fréquence des successions de cultures au regard de l'assolement de l'UCS (reconstitué à partir de l'assolement RPG).
- La seconde partie consiste à affiner la fréquence des successions de cultures au regard de la compatibilité des systèmes de cultures par rapport aux propriétés des UTS.

- Exemple illustratif

La méthode sera illustrée à partir de l'exemple de l'UCS 66 présente dans l'UMA 151 (Perche). La SAU de cette UCS est de 2850 ha, soit environ 5% de la SAU de l'UMA 151.

3.3.1 Partie 1 : caractérisation de l'assolement de successions de cultures des UCS

L'objectif de cette partie est de produire, à l'échelle des UCS, un assolement de successions de cultures compatible avec l'assolement des cultures (quantifié à partir du RPG) sur les UCS.

- Quantification de la répartition des cultures sur les UCS

Le croisement spatial des UCS avec les îlots RPG (2007-2014) permettent d'estimer les surfaces occupées par chaque culture (ou groupe de cultures) au sein de chaque UCS. L'assolement de l'UCS peut alors être mis au regard de l'assolement de l'UMA. Pour des raisons de représentativité statistique et pour simplifier le travail de synthèse présenté ci-après, les UCS dont la SAU représentant moins de 2% de la SAU des UMA sont regroupées avec les UCS moyennes dont la description pédologique (via les UTS) est la plus proche qualitativement.

La Figure 18 représente l'assolement des principales cultures de l'UCS 66 au regard de la moyenne de l'UMA 151. Cette UCS est caractérisée par une forte proportion de prairies permanentes (24% de la SAU) par rapport à la moyenne de l'UMA (9%). Par conséquent, les cultures annuelles sont moins présentes sur cette UCS que sur la moyenne de l'UMA : blé tendre (moyenne UCS n°66 : 27% ; moyenne UMA 151 : 37%), orge (moyenne UCS n°66 : 10% ; moyenne UMA 151 : 15%), colza (moyenne UCS n°66 : 14% ; moyenne UMA 151 : 20%).

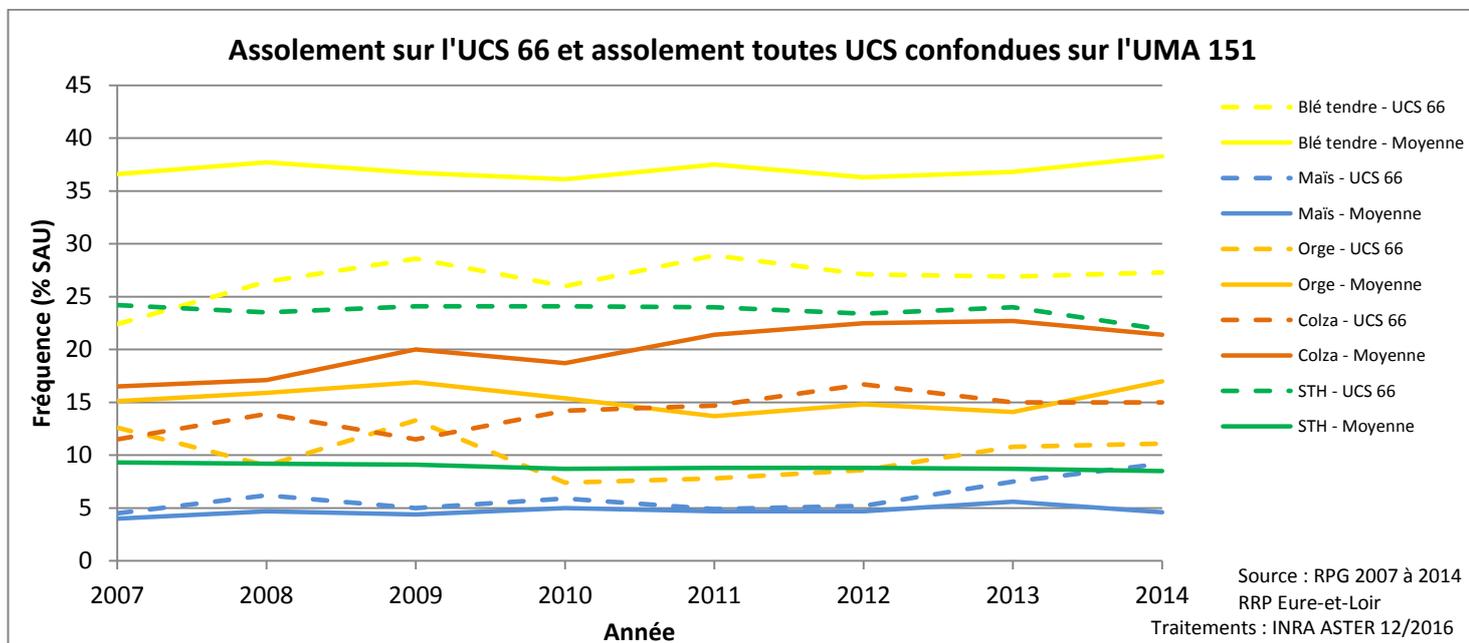


Figure 18 : Assolement moyen sur l'UMA 151 et sur l'UCS 66 de l'UMA 151 entre 2007 et 2014

A partir de ces observations, il est possible de quantifier la distribution des cultures par rapport au type de sol au regard de la distribution moyenne observée dans l'UMA.

- Hypothèse de distribution des successions de cultures observées à l'échelle de l'UMA

Le point précédent permet de quantifier un différentiel de distribution des cultures dans l'UCS par rapport à la moyenne régionale. Cette distribution est quantifiable uniquement depuis le milieu des années 2000 et l'ouverture des données du Registre Parcellaire Graphique. L'extrapolation des observations actuelles dans le passé nécessite un certain nombre d'hypothèses dont les principales sont les suivantes :

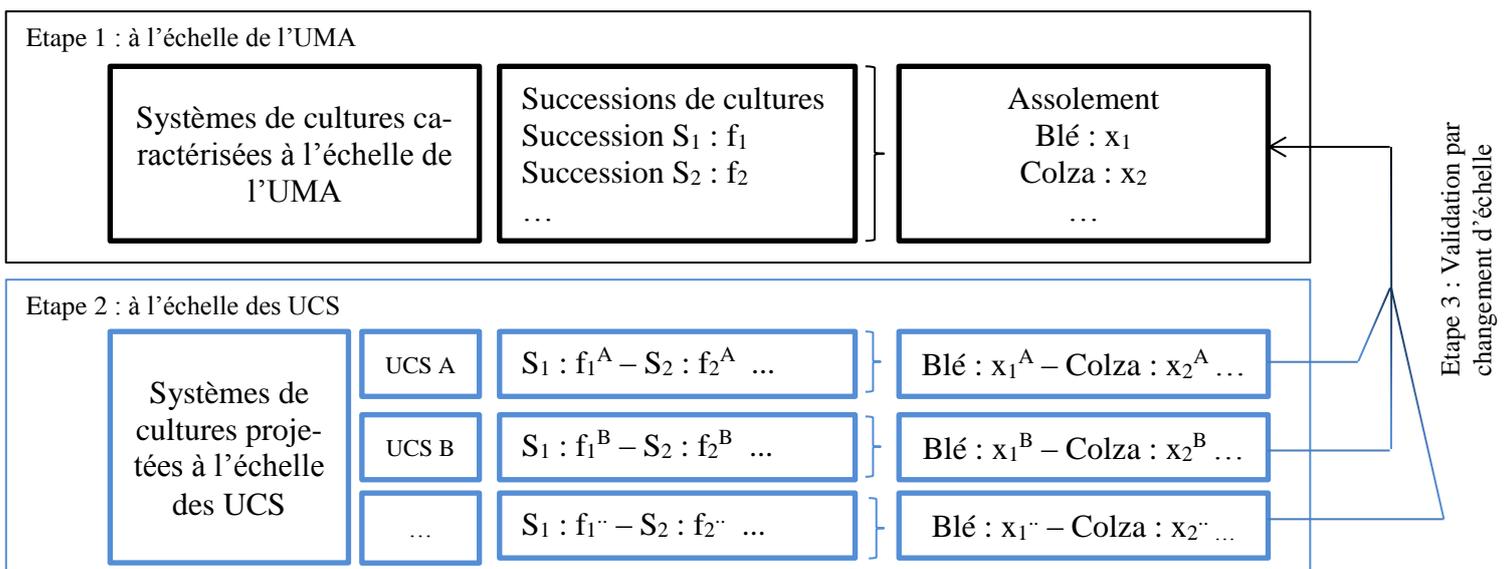
	Hypothèse	Argument sous-jacent	Argument opposable ¹⁷
1	La répartition des prairies suit la distribution actuelle		La destruction des prairies s'est faite en premier sur les sols à plus fort potentiels
2	L'absence de cultures industrielles est liée à des facteurs physiques du sol, propriété invariante du sol	Il est difficile de cultiver les cultures industrielles (Bs, Pdt, Pois) sur des sols caillouteux, à faible réserve utile, à forts taux d'argiles ou hydromorphes.	Des facteurs biologiques (nématodes, maladies) peuvent se manifester de manière irrégulière dans le temps (apparition, disparition)
			il est possible de modifier certains facteurs physiques du sol (drainage, irrigation).

Tableau 4 : hypothèses d'extrapolation de la distribution des cultures en fonction des types de sols

Du fait de ces hypothèses qu'il sera difficile de vérifier, seule la période récente (couverte par le RPG) sera considérée dans le cadre de ce travail exploratoire.

- Ajustement des fréquences des successions de cultures

Le travail initial a abouti à la caractérisation de successions de cultures dont la fréquence est caractérisée dans une matrice (une fréquence est attribuée à chaque succession, voir chapitre 2) à partir de laquelle, il est possible de décrire l'assolement des cultures (Etape 1 de la Figure 19).



¹⁷ Outre celui faisant valoir l'absence d'informations permettant la validation de l'hypothèse dans le passé.

Figure 19 : Schéma conceptuel de spatialisation des successions de cultures par rapport aux types de sols

L'étape 2 (Figure 19) est un travail itératif d'ajustement de la fréquence des successions de cultures à l'échelle des UCS. La première étape de l'itération consiste à supposer que la matrice des fréquences des successions de cultures à l'échelle de l'UCS est identique à la matrice des fréquences caractérisée à l'échelle de l'UMA. Les étapes suivantes (dont le nombre est a priori indéfini) consistent à modifier cette matrice jusqu'à ce que l'assolement des cultures (calculé à partir de la matrice des fréquences des successions) soit égal à l'assolement réel (calculé à partir du RPG). L'étape 2 abouti à la définition, pour chaque UCS, d'une matrice des fréquences spécifique à l'UCS.

- Validation : assolement à l'échelle de l'UMA

Une fois l'étape 2 réalisée pour toutes les UCS de l'UMA, on vérifie que l'assolement issu du portefeuille d'UCS (modulé par la fréquence de couverture spatiale des UCS de l'UMA) est égal à l'assolement initial de l'UMA estimé à partir des données RPG (Etape 3 de la Figure 19).

Compte tenu des hypothèses formulées précédemment tant sur la caractérisation des assolements à l'échelle des UCS que des assolements caractérisés à l'échelle des UMA, il serait trop chronophage, dans le cadre d'un travail exploratoire, de reproduire à l'exacte identique les assolements définis à l'échelle de l'UMA à partir du portefeuille d'UCS. Cependant, pour limiter la dérive et des différences de sole importants entre échelles (UCS et UMA), on fixe arbitrairement un seuil d'écart d'au plus 0.5% (pour chaque culture) entre assolements.

A titre d'exemple, la Figure 20 présente la comparaison des assolements en blé tendre à l'échelle des UCS (couleur bleue, correspondant aux assolements de l'étape 2 de la Figure 19) et l'assolement initial et défini à l'échelle de l'UMA (couleur noire, correspondant à l'assolement de l'Etape 1 de la Figure 19). Dans l'exemple pris, la différence est inférieure est de 0.3% donc jugée non significative.

UMA	UCS	Fréquence de l'UCS (% UMA)	% blé tendre dans l'UCS (moyenne 2006-2014)
151	10	3	38.4
	20	8	38.0
	23	6	39.5
	24	5	38.4
	26	5	37.4
	27	17	36.2
	31	7	35.9
	32	2	38.1
	33	24	42.9
	63	5	38.4
	64	9	37.8

	65	5	33.9
	66	4	32.8
151	Toutes UCS (moyenne pondérée)		38.4
151	Valeur de l'UMA (source ARSEINE 3.4.3)		38.1

Figure 20 : Comparaison des assolements en blé tendre sur l'UMA 151 sur la période 2006-2014.

3.3.2 Partie 2 : Lien avec les unités typologiques de sol

Lors du comité de pilotage du 26 avril 2017, nous avons présenté la méthode présentée dans le chapitre précédent. Il est ressorti des échanges une nécessité de travailler à l'échelle des Unités Typologiques de Sol (UTS) et non des seules UCS.

Les UTS n'étant pas spatialisées, la méthode proposée dans le chapitre précédent ne peut pas s'appliquer directement sur les UTS. Nous sommes repartis de la caractérisation des systèmes de culture dans les UCS (3.3.1) pour affiner la description de la matrice de fréquence des successions à partir des différents UTS définis dans l'UCS en trois étapes.

Pour ce faire, nous avons mobilisé des travaux méthodologiques conduits dans le cadre du développement du logiciel RPG Explorer (Levavasseur et al, 2017).

- Etape 1 : Construction d'une matrice d'affectation culture / sol

L'objectif de cette étape est d'établir un ensemble de règles de décision de compatibilité des cultures en fonction des propriétés physiques des sols. Nous avons repris la structure des données telle que proposée par Levavasseur et appliquée au jeu de donnée disponible (RRP Eure-et-Loir) à partir de 5 paramètres physiques des sols : taux d'argiles, taux de cailloux, taux de calcaire, réserve utile maximale et hydromorphie. Chaque paramètre physique est décliné en 3 modalités.

Pour chaque modalité des paramètres physiques et pour chaque culture, nous attribuons une note de 0 (modalité strictement incompatible) à 1 (modalité non limitante). L'étape 1 abouti au Tableau 5.

Culture	Taux argiles			Cailloux			CaCO3			Rum			Hydromorphie		
	< 30%	30 - 45%	> 45%	< 5%	5 - 15%	> 15%	0	1 - 50g/kg	> 50g/kg	<100mm	100 - 150mm	>150mm	Null	Temporaire	Excessive
Bs sec	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0.01	0.6	1	1	0	0
Bs irrigué	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0
Bt	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
Co	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
OH-Esc	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
OP	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.1	0.8	1	1	0	0
Fev	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0.01	0.8	1	1	0	0
Pois	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0.01	0.8	1	1	0	0
MG sec	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.01	0.6	1	1	1	1
MG irrigué	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
PdT sec	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0.01	0.6	1	1	0	0
PdT irrigué	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0
PP	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
To	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.8	1	1	1	1	0

Tableau 5 : matrice de compatibilité des cultures en fonction des paramètres physiques des sols

Ainsi, nous proposons par exemple :

- Des contraintes strictes sur les teneurs en argile et en cailloux pour les cultures de betterave et pomme de terre.
- De fortes contraintes pour les cultures de printemps non irriguées sur les sols à faible réserve utile.
- Des contraintes strictes sur les sols hydromorphes pour les betteraves, pommes de terre, légumineuse et céréales de printemps.

- Etape 2 : Evaluation de la compatibilité succession de cultures * sol

A partir des propriétés de chaque UTS (taux d'argile, taux de cailloux, taux de CaCO₃, RUM_{max} et hydromorphie), nous pouvons établir une note de compatibilité $\Delta_{Culture}^{Sol}$ pour chaque couple culture * type de sol (UTS). Cette note est définie telle que :

$$\Delta_{Culture}^{Sol} = \varepsilon_{sol,culture}^{Argile} \times \varepsilon_{sol,culture}^{CaCO3} \times \varepsilon_{sol,culture}^{Cailloux} \times \varepsilon_{sol,culture}^{Hydromorphie} \times \varepsilon_{sol,culture}^{RUM}$$

Avec $\varepsilon_{sol,culture}^{paramètre}$ la valeur correspondante retenue dans le Tableau 5.

A partir de la définition des successions de cultures (ARSEINE) et de la note de compatibilité de chaque couple culture * sol, on peut calculer une note de compatibilité $\Delta_{succession}^{sol}$ de chaque combinaison succession de cultures * sol et définie telle que :

$$\Delta_{succession}^{sol} = \begin{cases} - 0 & \text{si au moins une culture de la succession est notée 0 pour le sol étudié} \\ - \sum \frac{\Delta_{culture}^{sol}}{nb \text{ de cultures dans la succession}} & \text{sinon} \end{cases}$$

Exemple d'application :

Sur les 4 unités de modélisation agricole présentes dans l'Eure-et-Loir, 9077 combinaisons succession de cultures * unité typologique de sol sont identifiées.

Pour illustrer la démarche, on se propose d'évaluer la note agronomique de la succession [Pomme de terre irriguée – blé tendre – betterave irriguée – blé tendre – Orge de printemps]. Le Tableau 6 présente un exemple de propriété de 3 UTS présentes dans le RRP d'Eure-et-Loir.

UTS	Nom UTS	Classes				
		Argiles	Cailloux	CaCO ₃	RUmax	Hydromorphie
10930	Sols épais, limoneux à limono-argileux, non hydromorphes, lessivés, de la Beauce chartraine et du Faux-Perche	< 30%	< 5%	0	>150mm	Nulle
19427	Sols peu épais à moyennement épais, limono-argilo-sableux, non hydromorphes, peu calcaires, caillouteux, sur des matériaux hétérogènes sur Calcaire de Beauce et Argile à meulière, de la bordure extrême des plateaux de Beauce	< 30%	> 15%	0	<100mm	Nulle
15843	Sols moyennement épais, limoneux à limono-argileux, alluviaux, non hydromorphes, des fonds de talwegs et petites vallées du Nord et confins de Beauce et Drouais, sur formation à silex, meulière, craie ou calcaire de Beauce	< 30%	< 5%	1 - 50g/kg	100 - 150mm	Nulle

Tableau 6 : Exemple de propriétés de 3 UTS de l'Eure-et-Loir

A partir des Tableau 5 et Tableau 6, on peut alors définir la note de compatibilité de chaque couple culture * UTS $\Delta_{Culture}^{Sol}$ (Tableau 7) et la note de compatibilité $\Delta_{succession}^{Sol}$ de la succession étudiée sur 3 UTS (Tableau 7).

	Culture / Succession	UTS		
		10930	19427	15843
Note agronomique $\Delta_{Culture}^{Sol}$	Pomme de terre irriguée	1	0	1
	Blé tendre	1	1	1
	Betterave irriguée	1	0	1
	Orge de printemps	1	0.1	0.8
Note agronomique $\Delta_{Succession}^{Sol}$	Pdt _{irr} -Bt-Bs _{irr} -Bt-OP	1	0	0.96

Tableau 7 : Exemples de note agronomique

A partir des notes agronomiques de compatibilité succession de cultures * type de sol (UTS), il devient possible d'estimer la fréquence de chaque succession de culture sur chaque couple UCS/UTS.

3.3.3 Synthèse et perspectives

Ce travail de spatialisation fine des successions de cultures par rapport aux types de sol est un travail exploratoire pour estimer la valeur ajoutée du point de vue de la modélisation par rapport au travail conduit actuellement à l'échelle des UMA d'Eure-et-Loir. Le travail d'affectation des successions de cultures aux UTS nécessite de multiples validation lors des changements d'échelle (UCS puis UMA, notamment vis-à-vis des assolements et des pratiques) et a été mis en place dans le cadre de l'UMA 131 sur la période récente.

Or il convient de rappeler que la donnée initiale utilisée pour la caractérisation des systèmes de culture à l'échelle des UTS est issue de la caractérisation de systèmes statistiques à une échelle régionale (l'unité de modélisation agricole). Les hypothèses successives formulées quant à l'équi-répartition des systèmes de culture (en particulier au regard des itinéraires techniques) à l'échelle des UTS mériteraient d'être validées par le biais d'enquêtes directes en exploitation car extrapolent, à des échelles quasi-parcellaires, des pratiques statistiques régionales. De plus, le travail a été réalisé sur la période récente sur la base de données finement localisées (RPG) et nécessiteraient, pour être extrapolé dans le passé où ces sources d'information finement localisées (RPG) n'existaient pas, certaines hypothèses que nous n'avons pas souhaité faire dans le cadre de ce travail très exploratoire.

Enfin, le choix a été fait de focaliser le travail sur l'Eure-et-Loir pour des raisons de modélisation. Or dans cette région, les sols sont relativement homogènes et peu discriminants de la localisation des cultures par rapport à d'autres régions, notamment de plateaux comme illustré dans le paragraphe 3.1, où les gradients d'occupation du sol selon les types de sols (très liés à la topographie) sont très forts et qui pourraient faire l'objet d'investigations plus approfondies.

4. Actualisation de la base de données ARSEINE

Un enjeu important des bases de données est leur actualisation régulière pour suivre les dynamiques agricoles. La mise à jour complète (assolements + pratiques agricoles / itinéraires techniques) est un travail d'une part, lourd à conduire compte tenu de la méthode proposée (statistiques agricoles, enquêtes auprès d'acteurs agricoles du bassin, synthèse et implémentation dans la base de données) et d'autre part, fortement dépendant de la fréquence de mise à jour et le niveau de détail des bases de données nationales telles que le recensement agricole (fournissant des informations sur les assolements avec une nomenclature fine, sur les pratiques – irrigation, couverture du sol en interculture – travail du sol – et sur les activités d'élevage) ou l'enquête pratiques culturales.

Le volet caractérisation des pratiques agricoles (itinéraires techniques) représente la charge la plus importante de travail de la mise à jour complète de la base de données (traitements statistiques, enquêtes auprès d'acteurs, synthèse). Nous proposons dans cette partie une méthode d'actualisation simplifiée de la base de données centrée exclusivement sur les occupations du sol et leurs évolutions (la méthode proposée sera illustrée à partir du cas de l'UMA 152, située en Eure-et-Loir – exemple utilisé dans la partie 3) et considérant les itinéraires techniques constants par rapport à la période la plus récente (2006-2014). Dans cette optique, seules les statistiques agricoles annuelles sont nécessaires à l'actualisation d'ARSEINE. Le Registre Parcellaire Graphique, s'il présente l'avantage d'avoir une précision spatiale très fine, décrit les cultures selon une nomenclature grossière (pas de distinctions entre pois et féverole, entre orge de printemps et orge d'hiver, entre betteraves et pommes de terres), ce qui en limite l'utilisation au regard du niveau de détail de la nomenclature des statistiques agricoles annuelles. Le contenu diffusé du RPG étant de plus sujet à discussion notamment sur l'exhaustivité de son contenu (possiblement réduit au seul groupe de culture majoritaire contrairement au RPG diffusé jusqu'en 2014 dans ses niveaux 2 et plus), il s'avèrerait risqué de proposer une méthode exclusivement basée sur une source d'information dont le format et le contenu ne sont pas stabilisés.

La méthode d'actualisation simplifiée d'ARSEINE se décline en plusieurs étapes :

- Estimation de l'évolution des assolements des UMA

La méthode proposée est identique à celle utilisée dans le paragraphe 2.3 à l'exception que l'indice $K_{c,i}^{Nn}$ est égal à la valeur calculée lors du précédent recensement agricole (et non calculée au regard de l'évolution de l'indice entre le recensement précédent et le suivant, ce dernier n'ayant pas encore eu lieu).

Ainsi, dès la mise à disposition des statistiques agricoles annuelles (sur le site du ministère : DISAR¹⁸), il est possible d'estimer l'assolement de chaque UMA. Les éléments techniques de la démarche sont détaillés dans l'Annexe 1, partie *Mise à jour simplifiée de la base de données (via les assolements)*. La mise à jour simplifiée de la base de données, bien que la procédure soit détaillée pas à pas, nécessite quelques notions d'utilisation de VBA (Excel & Access).

- Modification de la base de données

La mise à jour de la base de données passe par un certain nombre d'étapes (techniquement détaillées dans l'Annexe 1). Compte tenu que la base de données a été livrée avec une définition s'arrêtant en 2014, il convient de ne pas modifier les données existantes. Par conséquent, l'utilisateur doit créer, pour chaque UMA, une nouvelle période homogène qui couvre les années ultérieures à 2015. Les périodes homogènes pouvant être simplement rallongées d'une ou plusieurs années lors de la publication de nouvelles statistiques agricoles. L'utilisateur devra alors faire évoluer les assolements à travers la mise en place (et le paramétrage) de successions de transitions (c'est-à-dire ayant une fréquence évolutive¹⁹ dans le temps au sein de la période homogène, voir 2.3).

Dans tous les cas, il sera nécessaire, pour les besoins de la modélisation, d'affecter aux successions néo-formées un ensemble d'itinéraires techniques (afin de reconstituer l'ensemble des systèmes de culture). La caractérisation des itinéraires techniques étant une étape lourde, l'actualisation simplifiée de la base de données peut faire appel aux itinéraires techniques caractérisés sur la période 2006-2014 (se référer alors à l'Annexe 1 pour identifier, dans les tables d'ARSEINE, les données correspondantes aux itinéraires techniques adéquats).

Par ce biais, il est aussi possible de faire évoluer les itinéraires techniques si un certain nombre d'informations sont facilement et rapidement accessibles.

Les itinéraires techniques référencés dans la base de données ne doivent en aucun cas être modifiés directement (pour pouvoir compléter la base de données, les tables - et leur contenu - ne sont pas verrouillées). Si l'utilisateur souhaite impulser des évolutions de pratiques (ex : augmentation ou réduction de fertilisation), il devra obligatoirement passer par la création de nouveaux itinéraires techniques (au risque, sinon, de modifier la caractérisation des pratiques passées).

¹⁸ <https://stats.agriculture.gouv.fr/disar/>

¹⁹ Celle-ci venant naturellement en déduction de la fréquence d'une ou plusieurs autres successions de manière à représenter exactement 100% de la SAU chaque année.

- Représentations graphiques

Outre les représentations telles que proposées dans les paragraphes 2.4.2 et 2.4.3, les évolutions d'assolement sont accessibles à partir de procédures techniques automatisées détaillées en Annexe 1. Ces représentations (projection des assolements ARSEINE sur la base des assolements reconstitués à partir des SAA) sont utiles pour caractériser les évolutions représentées dans les bases de données.

5. Modélisation de scénarii agricoles

Lors de la phase précédente, un exercice de prospective agricole avait été conduit. La teneur de cet exercice consistait à appliquer le programme de mesures de l'Agence. Les propositions d'évolution étaient alors de deux ordres : d'une part des évolutions liées au statut « Zone vulnérable Nitrates » avec des mesures principalement orientées vers la couverture des sols en hiver (CIPAN) et d'autre part des évolutions liées à la localisation des aires d'alimentation de captages (réduction de fertilisation, remise en herbe...). Si ce scénario présentait l'avantage de s'intéresser à des évolutions de pratiques agricoles souhaitées par l'Agence, il ne permettait pas de prendre en considération des évolutions de systèmes de production d'une part au regard des évolutions observées ces quarante dernières années et d'autre part aux évolutions possibles de système de production liées aux évolutions possibles du climat. Face à ces limites et à la multiplicité des initiatives de scénarisation agricole (voir 5.1), il nous paraissait important de travailler sur un scénario d'évolution de l'agriculture du bassin, basé sur une caractérisation au temps long de certaines variables plus systémiques que les seules doses de fertilisants ou couvertures des sols durant l'interculture.

L'exercice présenté dans ce chapitre n'a pas pour objectif de faire une synthèse bibliographique des scénarii existants mais de proposer deux images différentes d'évolution possible des agricultures du bassin. Ce travail a été conçu pour partie sur la base d'une étude de variables météorologiques reconnues comme ayant un impact sur écosystèmes agricoles. Certains exercices de prospective agricole sur le bassin ont été (pour partie) repris pour proposer des évolutions du bassin, en vue d'en évaluer, in fine, l'impact sur les ressources en eau (Gallois et Viennnot, 2018)

5.1 Sources d'information mobilisées

Les sources d'information mobilisées sont de deux ordres qu'il nous paraît important de distinguer au regard de leur statut dans un exercice de prospective : les statistiques pour caractériser les évolutions passées des territoires et les exercices prospectifs.

Le rapport « Scénarios d'évolution climatique. Impacts et incertitudes » (Viennnot et Gallois, 2017) présente de manière approfondie cinq scénarii climatiques envisagés dans le cadre de l'exercice de prospective. Il ressort de ce travail que le scénario CanESM2 représente le modèle médian et qui sera utilisé dans les simulations de prospective agricole (Viennnot et Gallois, 2017). L'ensemble des éléments climatiques illustrés dans ce chapitre ont été obtenus à partir de la valorisation des données du modèle CanESM2 désagrégé à l'échelle de la maille météo SAFRAN. **Il convient donc de lire et d'interpréter les données présentes dans ce document au travers du choix du modèle CanESM2 pour des scénarii d'émission RPC 4.5 et RCP 8.5, l'utilisation d'autres modèles et/ou d'autres scénarii pouvant donner des résultats différents.**

5.1.1 Les statistiques de caractérisation historique des territoires

- Données météorologiques

L'étude de l'évolution des conditions météorologiques a été conduite sur la base de l'analyse des données du modèle CanESM2, désagrégées à l'échelle de la maille SAFRAN. Les scénarii d'évolution RCP4.5 et RCP8.5 ont été mobilisés.

- Données agricoles

Les recensements agricoles 1970 et 2010 ont été utilisés pour caractériser certaines évolutions des systèmes de production passés.

La base de données ARSEINE (voir chapitre 2) a été utilisée comme support de caractérisation des systèmes de culture.

5.1.2 Les exercices prospectifs

- Données météorologiques

De même que pour l'analyse des évolutions des conditions météorologiques passées, le modèle CanESM2 et ses projections futures (jusqu'en 2050) ont été utilisées.

- Scénarii agricoles

De nombreux travaux et documents ont été consultés pour la conception de ces scénarii climatiques. Toutes les propositions d'évolution qu'ils proposaient n'ont pas été retenues, aussi il serait difficile d'identifier le degré de ressemblance entre les scénarii proposés dans ce document et les travaux consultés. Citons tout de même les principales ressources mobilisées :

- Une prospective agricole réalisée par le ministère de l'agriculture (Vert J et al, 2013.)
- Le projet RESET réalisés dans le cadre du GIP Seine Aval (Garnier et al, 2017)
- Le scénario Afterres 2050 (Solagro, 2016)
- Une réunion de travail spécifiquement conduite à l'Agence de l'Eau Seine Normandie avec les principaux acteurs du projet
- Une réunion de travail spécifique avec Marc Benoit (INRA ASTER Mirecourt)

5.2 Les indicateurs d'évolution de l'agriculture sur le bassin

En vue d'apporter des éléments quantitatifs objectifs sur les scénarii d'évolution de l'agriculture, nous avons choisi, en plus d'ajuster progressivement les cycles culturaux au regard de l'évolution climatique (5.4), d'apporter un certain nombre d'indicateurs pour comparer les scénarii entre eux et avec la caractérisation passée de l'agriculture du bassin (via ARSEINE).

5.2.1 L'élevage sur le bassin

La caractérisation des systèmes de culture dépend directement des activités d'élevage sur le bassin dans la mesure qu'une grande partie des effluents d'élevage (sous forme de fumier, lisier, etc...) est épandue dans la région de production (sauf de rares cas, négligeables à l'échelle du bassin). Il est donc important de caractériser les activités d'élevage pour estimer les niveaux de fertilisation organique restitués aux systèmes de culture (sous forme d'épandages ou de restitution au pâturage). Pour caractériser l'évolution de l'élevage sur le bassin, nous avons choisi le caractériser sur la base d'indicateurs de chargements globaux (UGB/ha SAU – bovins, porcins et volailles) et de chargements relatifs aux surfaces fourragères (UGB/ha SFP – bovins uniquement).

5.2.2 Evolution des systèmes de culture

5.2.2.1 Evolution des assolements

L'évolution des assolements est caractérisée sur la base des cultures (prairies, blé, maïs, betterave, protéagineux...) observées et leurs évolutions dans le temps. Si cette manière de représenter est multifactorielle (1 indicateur par culture – surface exprimée en fréquence de SAU), une autre manière de représenter est de calculer un indicateur de diversité des assolements. L'indice de Shannon (Shannon et Weaver, 1949) est un indicateur couramment utilisé.

Dans le cas présent, nous le définissons tel que $H_{(UMA,Annee)}^{assolement} = - \sum_{i=1}^n p_i * \ln(p_i)$ avec p_i la part de la culture i dans la sole de l'UMA considérée une année donnée et n le nombre de cultures observées. Cet indicateur est souvent accompagné de l'indice d'équitabilité de Pielou (Grall et Coïc, 2005) défini tel que

$$E_{(UMA,Annee)}^{assolement} = \frac{H_{(UMA,Annee)}^{assolement}}{\text{Log}(n)}$$

5.2.2.2 Diversité des successions de culture

Comme détaillé dans Puech et al, 2015, la base de données ARSEINE caractérise un ensemble de systèmes de culture à l'échelle des UMA. Chaque système de culture est donc défini par une succession de culture. Chaque UMA est définie par un ensemble de successions de cultures dont la fréquence définit l'assolement à une date donnée. Or si la caractérisation des assolements permet de fournir un certain nombre d'informations sur la diversité des cultures observées dans une région, elle ne fournit pas d'information sur l'enchaînement temporel des cultures dans le temps et par conséquent la diversité d'espèces cultivées au sein des successions de cultures.

Pour rendre compte de l'évolution de la diversité des successions de cultures, il serait possible de définir un ensemble d'indicateurs sur le nombre moyen de cultures dans les rotations, les délais de retour de chaque culture (en lien avec des problématiques de type aphanomyces sur pois) ou la fréquence des couples de type blé / blé. Si cette possibilité est facilement accessible compte tenu de la structuration des

données sous forme de base de données, il nous paraît plus intégrateur de définir un indicateur de diversité $H_{(UMA, Annee)}^{succession}$ des successions de cultures basé sur l'indice de diversité de Shannon (calculé à l'échelle de chaque succession de culture puis ramené au territoire) tel que :

$$H_{(UMA, Annee)}^{succession} = - \sum_{i=1}^n p_i * \sum_{j=1}^m f_j^i \ln(f_j^i)$$

Avec f_j^i la fréquence de la culture j dans la succession i et p_i la fréquence de la succession i dans l'UMA l'année considérée.

Compte tenu du mode de calcul différent, il ne convient pas de comparer les valeurs absolues de $H_{(UMA, Annee)}^{assolement}$ et $H_{(UMA, Annee)}^{succession}$ mais de considérer l'évolution temporelle de chacun de ses indicateurs pris indépendamment l'un de l'autre pour apprécier respectivement l'évolution de la diversité des assolements et des successions de cultures correspondante.

5.2.2.3 Evolution de la fertilisation

Comme l'évolution de la fertilisation organique dépend très directement des effectifs animaux (exception faite des épandages de type boues de station d'épuration, vinasses de sucreries, importations d'engrais organiques déshydratés), représenter l'évolution de la fertilisation organique revient à représenter l'évolution des effectifs animaux déjà présenté précédemment (5.2.1). Nous avons choisi de ne pas représenter cet aspect mais il convient de savoir que la restitution d'azote organique est couplée à l'évolution des effectifs animaux.

En revanche la représentation de la fertilisation minérale porte tout son intérêt. Par souci de simplification, nous avons choisi de ne représenter que l'évolution de la fertilisation minérale sur blé tendre, culture la plus représentée sur le bassin²⁰.

5.2.2.4 Place de l'irrigation dans les systèmes de culture

Compte tenu des évolutions possibles des conditions météorologiques (déficits hydriques accrus en été), le recours à l'irrigation est une technique possible pour limiter les déficits hydriques. Une note de synthèse produite par P. Viennot (Viennot et al, 2017) permet de définir l'impact sur les masses d'eau souterraines

²⁰ La fertilisation minérale des autres cultures est gérée dans la même logique.

de différents niveaux de prélèvement par l'irrigation. Le raisonnement des surfaces irriguées des différents scénarii a été conduit sur la base du contenu de cette note.

Classiquement, la place de l'irrigation est caractérisée par l'indicateur de fréquence de surfaces irriguées. Or dans une optique de raisonnement quantitatif de gestion des ressources en eau souterraines, il convient d'affiner cet indicateur qui ne représente pas (ou de manière très approximative) les volumes prélevés par l'irrigation. En effet 10% de SAU irriguée à 50mm (irrigation classique d'une céréale de type blé tendre) et une irrigation de 10% de SAU irriguée à 150mm (irrigation classique de pomme de terre) représentent une même surface irriguée mais avec un facteur 3 sur les volumes effectivement prélevés. Pour s'affranchir du biais lié à la nature des cultures irriguées tout en conservant des indicateurs couramment utilisés (fréquence de superficies irriguées), l'irrigation sera représentée en fréquence de SAU irriguée à 100mm.

5.3 Résultats : Evolutions possibles du climat

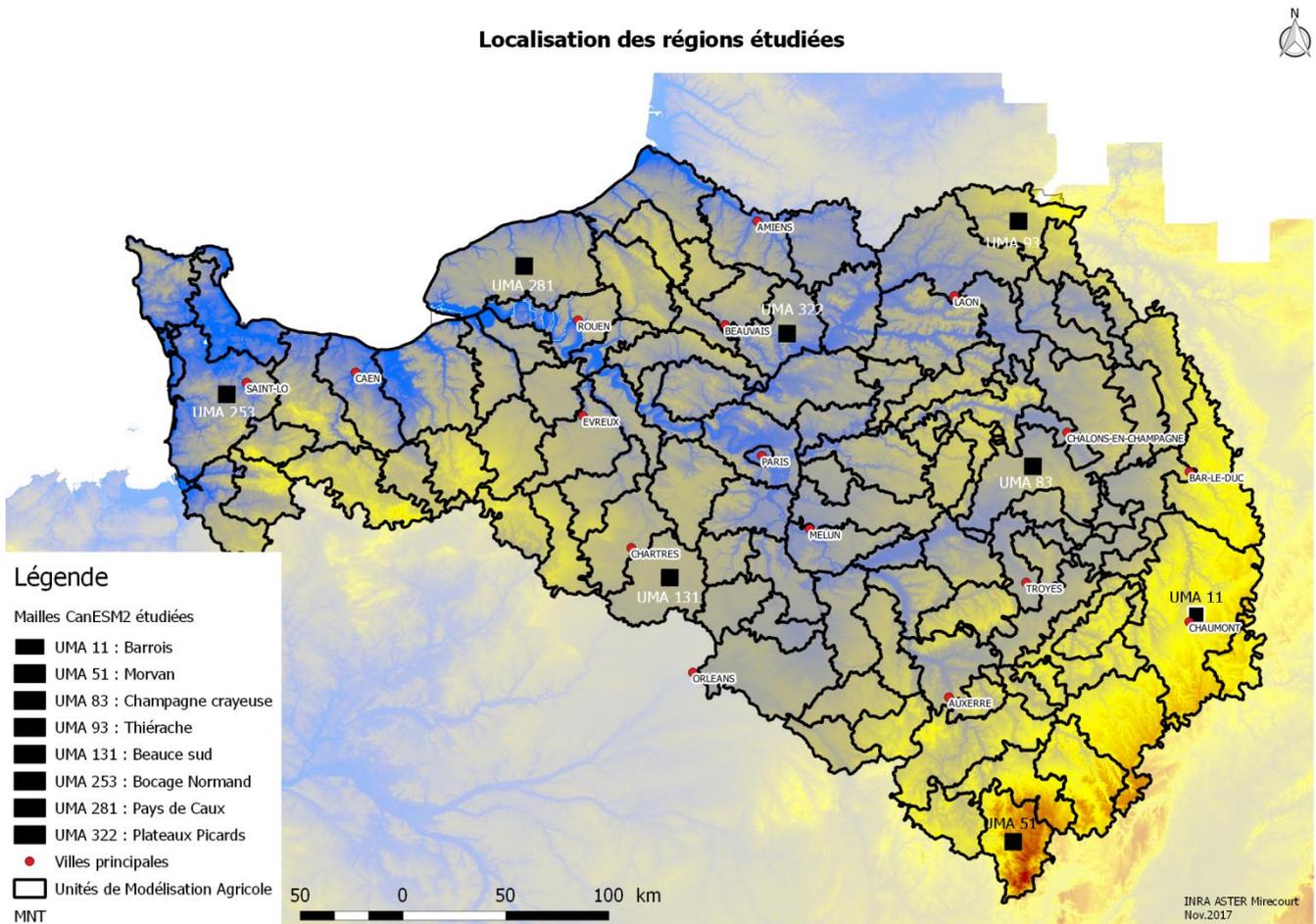
Afin d'illustrer les évolutions possibles du climat sur le bassin Seine-Normandie, les données climatiques ont été analysées sous l'angle d'un certain nombre de variables ayant un sens du point de vue de l'agronomie. Les variables sont regroupées dans le Tableau 8. Pour limiter l'effet d'années singulières, le choix a été fait d'analyser ces variables sur la base de moyennes calculées par cycles de vingt années.

Variable	Intérêt
Somme de températures	Permet principalement pour les cultures de printemps (principalement maïs, plus marginalement pour le pois, le soja, le tournesol) d'estimer des précocités des variétés et leurs potentiels de production en termes d'exigences de températures (du semis à la récolte).
Températures moyennes décennales	Si les températures moyennes décennales peuvent cacher de fortes variabilités, elles permettent de renseigner les tendances lourdes d'évolution des températures
Nombre de jours chauds par décennie	Sont entendus par nombre de jours chauds, le nombre de jours où la température maximale est supérieure à 25°C. Au-delà de cette température, la physiologie des céréales peut être altérée et provoquer des pertes parfois significatives de rendement (phénomène d'échaudage).
Nombre de jours de gel par décennie	Nombre de jours où la température est inférieure à resp. -1°C, -5°C et -10°C. Cet indicateur permet d'apprécier l'intensité et la durée des phénomènes de gel.
Bilan hydrique décennal	Déficit hydrique P-ETP
Précipitations mensuelles	Précipitations totales

Tableau 8 : liste des variables utilisées pour l'étude des évolutions du climat sur le bassin Seine Normandie.

Chacune des variables décrites précédemment a été étudiée sur la base des données issues du scénario RCP 4.5 et 8.5.

Pour caractériser l'évolution du climat de manière spatialisée sur le bassin Seine-Normandie, l'étude des variables du Tableau 8 a été conduite dans 8 contextes pédo-climatiques différents sur la base des données du modèle CanESM2 (scénario RCP4.5 et RCP 8.5) désagrégées à l'échelle de la grille SAFRAN. La Carte 12 localise les 8 contextes sur le bassin. Ces sites d'études couvrent une large diversité des conditions situations de production rencontrées sur le bassin : production laitière de basse Normandie (UMA 253) ou des Ardennes (UMA 93), élevage allaitant de montagne (UMA 51), polyculture élevage Normande (UMA 281) ou des plateaux de l'Est (UMA 11) et grandes cultures céréalières (UMA 131, 83 et 322).



Carte 12 : localisation des sites retenus pour la caractérisation de l'évolution du climat.

Pour plus de détails sur les éléments cités ci-après, l'Annexe 3 présente l'évolution des indicateurs précédemment cités déclinés selon chaque maille analysée.

5.3.1 Evolution des températures moyennes

De manière généralisée, les températures décennales moyennes augmentent de manière relativement homogène sur l'année. Par rapport à la période 1980-2000, les températures de la période 2040-2060 augmenteraient en moyenne de 1.7°C (sur les 8 sites d'étude) pour le RCP 4.5 et de 2.1°C pour le RCP 8.5 avec des augmentations moins marquées dans les régions littorales que dans les régions continentales.

UMA	RCP 4.5	RCP 8.5
11	+ 2.1 °C	+ 2.5 °C
131	+ 2.0 °C	+ 2.4 °C
253	+ 1.6 °C	+ 1.9 °C
281	+ 1.3 °C	+ 2.0 °C
322	+ 1.9 °C	+ 2.3 °C
51	+ 2.1 °C	+ 2.5 °C
83	+ 2.1 °C	+ 2.5 °C
93	+ 1.9 °C	+ 2.3 °C
Moyenne sur les 8 sites d'étude	+ 1.9 °C	+ 2.3 °C

Tableau 9 : Différence de température moyenne (°C) entre la période 1980-2000 et la période 2040-2060 selon les RCP 4.5 et 8.5.

5.3.2 Evolution des sommes de températures

La somme des degrés jours est une mesure empirique permettant d'estimer l'accumulation de chaleur nécessaire à la réalisation d'un cycle cultural (du semis à la récolte). Cette mesure est couramment utilisée pour les cultures de printemps telles que le maïs, le soja ou le tournesol. Les variétés de maïs sont définies d'une part par la destination de la récolte (fourrage / grain) et par leur précocité définie elle-même par une somme de degrés jours minimale à atteindre à la récolte (sous hypothèse de conditions d'alimentation hydrique suffisante). Ainsi, une variété précoce de maïs aura besoin de 1600°Jour pour arriver à maturité alors qu'une variété tardive nécessitera jusqu'à 1900°Jour. Des potentiels de rendement différents pourront être affectés à chaque variété. Dans le cas du maïs, les calculs sont réalisés sur une base 6°C (sur la température moyenne journalière).

Afin de proposer une comparaison des régions entre-elles et l'influence des évolutions climatiques sur les somme de degré jour, nous proposons de calculer les sommes de degré jour pour un maïs semé le 15 avril et récolté le 25 octobre²¹.

²¹ Ce cycle est théorique puisque les dates de semis et récolte varient selon les régions et la destination grain/fourrage du maïs mais ce cycle est supposé fixe afin de permettre de figer un point de comparaison entre régions.

L'Annexe 3 et le Tableau 10 mettent en évidence une augmentation significative des sommes de degré jour. Par rapport à la situation observée sur la période 1980-2000, les sommes de degré jour pourraient augmenter de 400 à 490°Jour dans le cadre du scénario RCP 4.5 (période 2040-2060) et de 470 à 630°Jour pour le scénario RCP 8.5.

UMA	Moyenne 1980-2000	2040-2060 (RCP 4.5)		2040-2060 (RCP 8.5)	
		Moyenne	Différence / période 1980-2000	Moyenne	Différence / période 1980-2000
11	1542	2022	480	2176	634
131	1648	2110	462	2245	597
253	1513	1885	372	1980	467
281	1537	1932	394	2055	518
322	1544	1986	442	2121	577
51	1498	1966	468	2132	634
83	1627	2113	486	2251	624
93	1508	1948	441	2087	579
Moyenne sur les 8 sites d'étude	1552	1995	443	2131	579

Tableau 10 : Evolution des sommes de degré jour entre le 15 avril et le 25 octobre (exprimée en °C, base 6°C)

5.3.3 Evolution du nombre de jours chauds

Le Tableau 11 représente le nombre de jours chauds et leur évolution en milieu de siècle par rapport à la situation 1980-2000. De même que l'évolution des températures moyennes (5.3.1), l'augmentation du nombre de jours chauds est plus importante dans les régions au centre et à l'Est du bassin qui ne bénéficient pas (ou dans une moindre mesure) de l'effet tampon thermique de la Manche.

L'Annexe 3 met en évidence qu'en milieu de siècle, le nombre de jours échaudants augmente durant la période estivale (juin – aout) mais que leur apparition pourrait se faire de plus en plus tôt dans la saison. En effet, si durant la période 1980-2000, les premiers jours chauds apparaissent à partir de la dernière décade d'avril, en milieu de siècle ces épisodes de forte chaleur pourraient faire leur apparition dès les premiers jours d'avril quelque-soit le scénario RCP considéré. Le scénario RCP 8.5 est de moitié plus marqué que le scénario RCP 4.5.

UMA	Moyenne 1980-2000	2040-2060 (RCP 4.5)		2040-2060 (RCP 8.5)	
		Moyenne	Différence / période 1980-2000	Moyenne	Différence / période 1980-2000
11	26	50	+ 24	64	+ 38
131	27	49	+ 22	61	+ 34
253	6	21	+ 15	25	+ 20
281	7	22	+ 15	29	+ 22
322	22	45	+ 23	57	+ 35

51	18	41	+ 23	53	+ 35
83	29	54	+ 25	68	+ 38
93	17	38	+ 22	49	+ 32
Moyenne sur les 8 sites d'étude	19	40	+ 21	51	+ 32

Tableau 11 : Evolution du nombre de jours chauds (Tmoy ≥ 25°C) entre la période 1980-2000 et 2040-2060

5.3.4 Evolution du nombre de jours de gel

Le Tableau 12 présente l'évolution du nombre de jours de gel (Tmin ≤ -1°C). Dans les régions les plus froides du bassin (UMA 11, 51), les premières gelées apparaissent dans la première dizaine d'octobre et les plus tardives peuvent apparaître jusque début mai (données 1980-2000). En milieu de siècle, la période de gelées serait réduite d'environ 1 mois : les premières gelées apparaîtraient mi-octobre et les dernières se termineraient début avril.

En milieu de siècle, les deux scénario RCP 4.5 et 8.5 sont relativement similaires et aboutiraient tous deux à une réduction d'environ 50% du nombre de jours de gel. Le constat est similaire pour les gelées plus fortes (Tmin ≤ -5°C) dont le nombre serait réduit de plus de 2/3. Les gelées inférieurs à -10°C deviendraient des phénomènes très rares y compris à l'Est du bassin.

UMA	Moyenne 1980-2000	2040-2060 (RCP 4.5)		2040-2060 (RCP 8.5)	
		Moyenne	Différence / période 1980-2000	Moyenne	Différence / période 1980-2000
11	38	21	- 17	23	- 15
131	19	9	- 11	10	- 9
253	6	2	- 4	2	- 3
281	9	3	- 5	4	- 5
322	26	14	- 12	14	- 12
51	35	19	- 16	22	- 13
83	31	17	- 14	17	- 14
93	26	14	- 12	15	- 11
Moyenne sur les 8 sites d'étude	24	12	- 11	13	- 10

Tableau 12 : Evolution du nombre de jours de gel (Tmin ≤ -1°C) entre la période 1980-2000 et 2040-2060

5.3.5 Evolution des précipitations

Le Tableau 13 présente l'évolution des précipitations annuelles sur les 8 sites étudiés sur le bassin. Les précipitations seraient globalement plus abondantes sur la période 2040-2060 que sur la période 1980-2000 quelque-soit le scénario d'émission considéré (5-10 % de précipitations annuelles supplémentaires). Cependant, l'Annexe 3 met en avant une répartition plus hétérogène des précipitations sur l'année avec un premier trimestre globalement plus arrosé (15-20 % de précipitations supplémentaires par rapport à

la période 1980-2000) mais un mois de juin plus sec avec un déficit de 20 à 30% par rapport à la situation connue dans les années 1980 – 1990. Les régions littorales (UMA 281 et 253) seraient globalement moins concernées par l'évolution des précipitations.

UMA	Moyenne 1980-2000	2040-2060 (RCP 4.5)		2040-2060 (RCP 8.5)	
		Moyenne	Différence / période 1980-2000 (en %)	Moyenne	Différence / période 1980-2000 (en %)
11	979	1073	10	1017	4
131	609	651	7	643	6
253	1030	1055	2	1075	4
281	1034	1049	1	1049	1
322	665	729	10	707	6
51	1303	1447	11	1398	7
83	705	799	13	760	8
93	874	978	12	960	10
Moyenne sur les 8 sites d'étude	900	973	8	951	6

Tableau 13 : Evolution des précipitations totales annuelles (en mm) et leur évolution entre la période 1980-2000 et la période 2040-2060

5.3.6 Evolution du bilan hydrique

L'Annexe 3 présente les évolutions décennales moyennes du bilan hydrique sur chacune des zones d'étude. Si les excédents s'accroissent sur le premier trimestre, le confort hydrique se dégrade tant en intensité (les déficits estivaux pourraient être plus marqués sur la période 2040-2060 que sur la période 1980-2000) qu'en durée puisqu'ils apparaîtraient plus tôt et se termineraient plus tard en particulier dans le cadre du scénario RCP 8.5.

5.4 Les impacts possibles du changement climatique sur les systèmes de culture à l'échelle du bassin Seine-Normandie

L'augmentation des températures hivernales et en particulier la diminution du nombre de jours de gel devrait permettre une accélération des stades phénologiques (Habets & Viennot, 2015). Le raccourcissement des cycles culturaux, et en particulier celui des céréales, devrait amener une avancée des dates de récolte (phénomènes d'échaudages et intensification des périodes de stress hydrique) et un probable recul des dates de semis pour d'une part esquisser les risques de stress hydrique en automne et d'autre part pour limiter un état physiologique trop avancé des cultures durant la période hivernale (et

une plus grande sensibilité aux épisodes de gelées même si ceux-ci seront moins fréquents) (Benoit et al, 2015).

L'évolution des températures devrait permettre de limiter le risque de gelées tardives (voir 5.3.4) et donc permettre un semis plus précoce des cultures de printemps telles que le maïs ou l'orge (Levrault, 2015) dans la mesure où les conditions de semis seront favorables (portance des sols) compte tenu de l'augmentation possible des précipitations sur le premier trimestre (voir 5.3.5). L'avancée des dates de semis pourrait permettre de limiter le nombre de jours échaudants durant la période de sensibilité des céréales (Levrault, 2015)(Benoit et al, 2015).

Par conséquent, il est possible que la durée des périodes d'interculture estivales augmente. Aussi, la mise en place de cultures dérobées pourrait devenir possible (Levrault, 2015) (sommées de températures plus favorables qu'actuellement) mais la disponibilité en eau pourrait s'avérer être un facteur limitant au développement des cultures dérobées de vente sur le bassin.

L'impact du changement climatique sur les rendements agricoles reste discuté. En effet, si certains arguments optent en faveur d'une augmentation des rendements des plantes en C3 (stimulation de la photosynthèse par l'augmentation des concentrations atmosphériques en CO₂), d'autres militent pour une diminution des rendements du fait de l'augmentation de la fréquence des épisodes météorologiques extrêmes (pluies intenses, sécheresses) (Habets & Viennot, 2015) ou chroniques²² (Brisson et al, 2010) si bien qu'il reste relativement difficile de prévoir avec certitude l'évolution possible des rendements (Brunelle, 2015) même si les plantes en C3 (blé) sembleraient moins affectées que les plantes en C4 (maïs, sorgho) (Benoit et al, 2015).

Concernant les cultures fourragères, il est à prévoir que les périodes de pousse de l'herbe soient rallongées au printemps et à l'automne (principalement favorisées par une augmentation de températures). Inversement, l'intensification des périodes de déficit hydrique en été laisse à penser que la production des surfaces en herbe soit ralentie durant la période estivale.

²² D'après BRISSON et al, 2010, l'augmentation observée des températures au printemps et en été explique (par le phénomène d'échaudage (Levrault, 2015)) pour une large part le plafonnement des rendements observés en France depuis la fin des années 1990

5.5 Scénario A : Une poursuite de la spécialisation et de l'intensification de l'agriculture du bassin Seine-Normandie (ScenA)

5.5.1 Quelques éléments de contexte

Le contexte agricole est favorable à l'augmentation de la taille des exploitations : les exploitations sont moins nombreuses et fusionnent. On voit apparaître l'émergence de très grandes structures avec des politiques de production et commerciales. Ces exploitations se sont agrandies suite aux aides en départ à la retraite et des aides à la modernisation. Elles sont généralement composées de plusieurs sites de production parfois éloignés de plusieurs dizaines de kilomètres et témoins d'un héritage composite issu du rachat d'anciennes exploitations.

Le modèle dominant est une agriculture de précision à forts niveaux d'intrants et de production. De gros moyens sont mis en place par certaines firmes pour le développement de variétés tolérantes aux épisodes de sécheresse et à certaines maladies et ravageurs qui ont migrés depuis le sud de l'Europe suite à l'évolution du climat. Les acteurs de la profession agricole sont dans une posture de scepticisme vis-à-vis des capacités de l'agriculture à atténuer le changement climatique. Des options d'adaptation techniques aux contraintes nouvelles du milieu (irrigation, nouvelles variétés, nouveaux matériels et molécules) sont préférées à des options systémiques (diversification).

On voit toutefois se maintenir des petites et moyennes exploitations mais dont le nombre et la surface représentent une très large minorité des structures. Ces exploitations sont plus ou moins spécialisées avec des labels d'origine (AOC, AOP, IGP) ou des signes de qualité (agriculture biologique) mais ne représentent pas plus de 5% de la SAU en 2050.

S'en suit une hyperspécialisation des productions du bassin. Les régions de plaine sont spécialisées dans des grandes cultures d'oléo-protéagineux et/ou de cultures industrielles avec une place importante des céréales et en particuliers du blé. Les techniques culturales sont de plus en plus simplifiées par manque de temps pour travailler l'ensemble des surfaces des exploitations (labour moins fréquent). Pour faire face à des problèmes agronomiques sur les rotations colza-céréales, certaines cultures sont réimplantées (pois, féverole) mais leur objectif principal est de casser certains cycles de développement des adventices et sont artificiellement soutenues par les politiques publiques car les marchés et les rendements ne leur sont pas favorables.

Certaines régions de montagne / plateaux sont progressivement délaissées par certaines filières (disparition des filières laitières sur une large façade Est du bassin). Les régions littorales poursuivent leur spécialisation dans un élevage laitier. Pour des raisons d'évolution des modes de vie, les exploitations laitières se sont largement mécanisées et l'utilisation de robots de traite devient un fait courant. Par conséquent, les animaux pâturent de moins en moins souvent (si ce n'est sur des aires de parcours à proximité des bâtiments d'élevage). Les pratiques sont adaptées en conséquence : les surfaces en herbe

sont quasi-exclusivement fauchées ou utilisées pour le pâturage des génisses. Les surfaces en maïs se développent pour permettre l'alimentation des vaches en bâtiments.

La consommation de viande et en particulier la viande bovine connaît une crise structurelle en Europe. La production de viande recule de 50%, aggravée par l'ouverture des marchés et l'importation d'une viande peu chère de l'étranger (Amérique, Australie...). Les régions productrices de viande bovine se spécialisent au même titre que d'autres régions se spécialisent dans la production laitière.

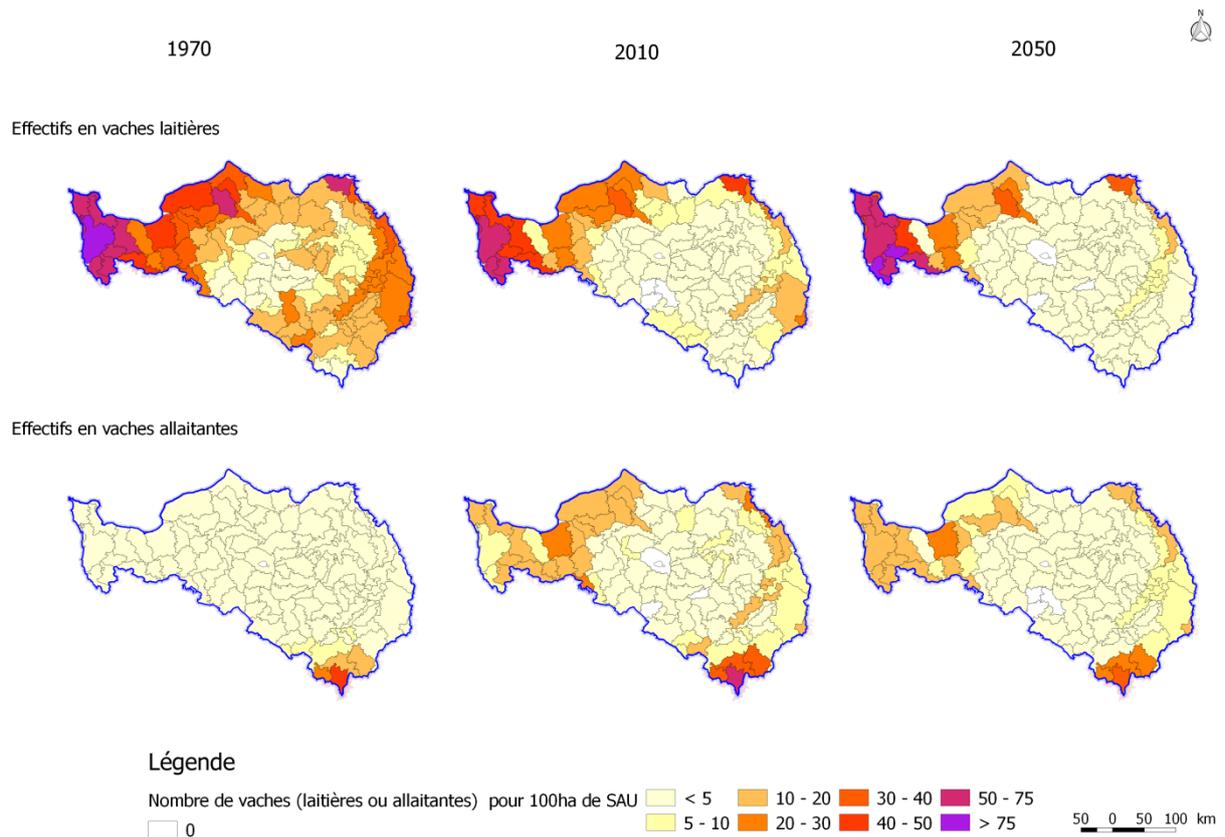
5.5.2 L'élevage sur le bassin

Les activités d'élevage sont en net recul sur l'ensemble du bassin (-10% pour les bovins lait, -20% pour les bovins allaitants). Seules les régions de tradition laitière conservent cette activité c'est-à-dire une large façade Ouest du bassin et les Ardennes. Le cheptel bovin allaitant recule globalement sur tout le bassin, sauf en Basse Normandie où il progresse légèrement et vient en complément du cheptel laitier (valorisation des surfaces en herbe éloignées des sièges d'exploitation). La Figure 21 met en évidence quatre types de trajectoires.

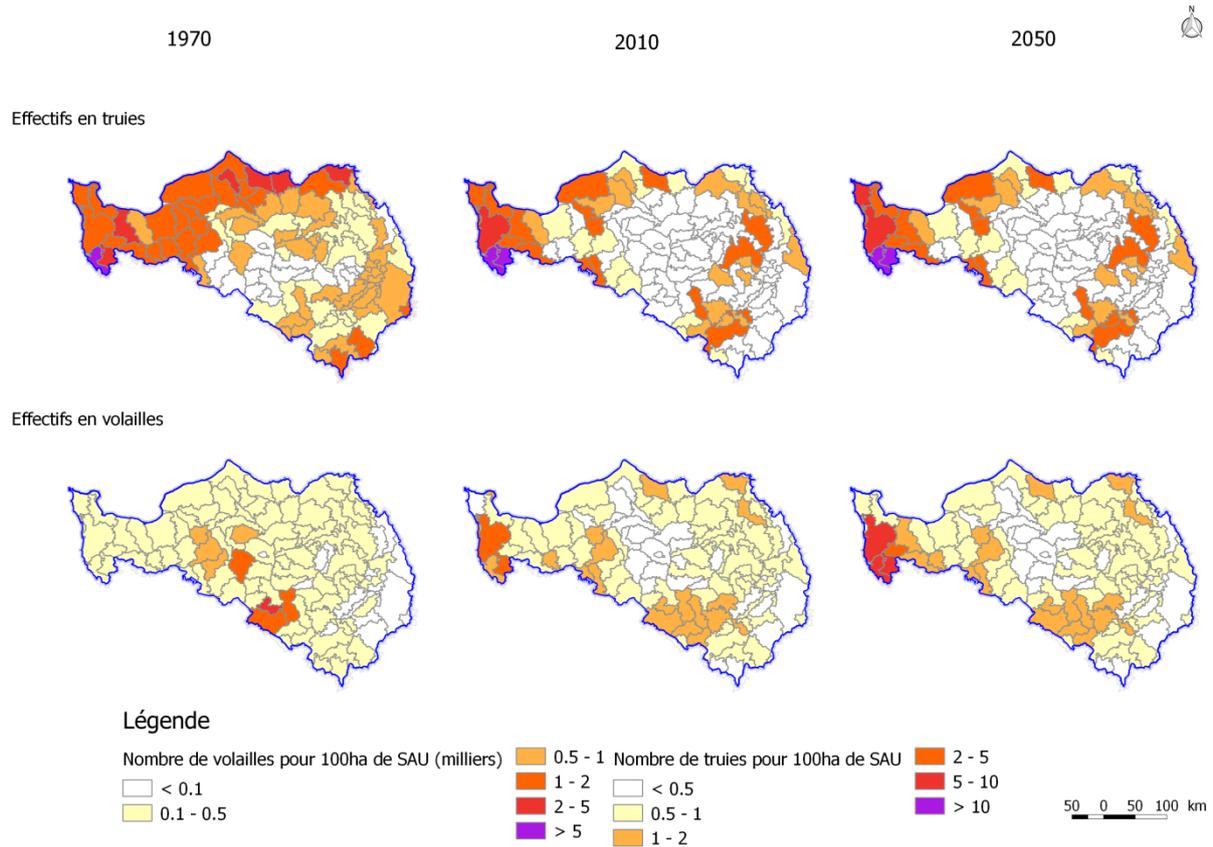
- ✓ La GRA 1 (Plateau de Bourgogne, de Langres et Barrois) : dans cette région, les activités d'élevage ont déjà nettement reculé en 2010 pour n'occuper que 20% de la SAU. En 2050, la surface fourragère est relativement similaire à 2010. Toutes les surfaces labourables sont déjà en cultures en 2010 et seuls les fonds de vallée et les parcelles les plus difficiles sont maintenues en herbe pour un élevage qui s'est largement extensifié en 2050.
- ✓ La GRA 2 (Morvan, Auxois) et les Ardennes : ces régions sont marginalisées et progressivement délaissées par les filières. Après un recul des surfaces fourragères et une intensification des systèmes de 1970 à 2010, les activités d'élevage progressent en surface et s'extensifient bien que le cheptel global tend à diminuer.
- ✓ La GRA 4 (Haute Normandie) : la position très favorable de la région tant par son potentiel pédo-climatique que par la proximité de Rouen a fait reculer les activités d'élevage de 1970 à 2010. Les tendances observées ces 40 dernières années se poursuivent à un rythme relativement constant : en 2050, les surfaces fourragères ont diminué de moitié par rapport à 2010 au profit des céréales et autres cultures industrielles. Dans un même temps, l'élevage bovin s'est progressivement sédentarisé dans les bâtiments où finalement le seul pâturage est celui permis sur les parcours à côté des salles de traite robotisées.
- ✓ La GRA 5 (Basse-Normandie) : contrairement à la GRA 4, la GRA 5 conserve son identité forte de région laitière. Si les surfaces fourragères ont régressé entre les années 1970 et 2010, elles l'ont beaucoup moins été entre 2010 à 2050. En revanche, le modèle d'élevage s'est

intensifié avec une réduction du pâturage et une augmentation de la taille des troupeaux dont les chargements sont devenus très importants.

Parallèlement aux évolutions constatées sur les activités d'élevage des bovins allaitants, les élevages hors-sol (porcs et volailles) se maintiennent voire se développent sur le bassin et en particulier en Basse Normandie (Carte 14). L'élevage en Île de France reste très marginal.



Carte 13 : Cartes d'évolution des effectifs de vaches laitières et vaches allaitantes pour le ScenA (1970 – 2010 et 2050).



Carte 14 : Cartes d'évolution des effectifs de truies et volailles pour le ScenA (1970 – 2010 et 2050).

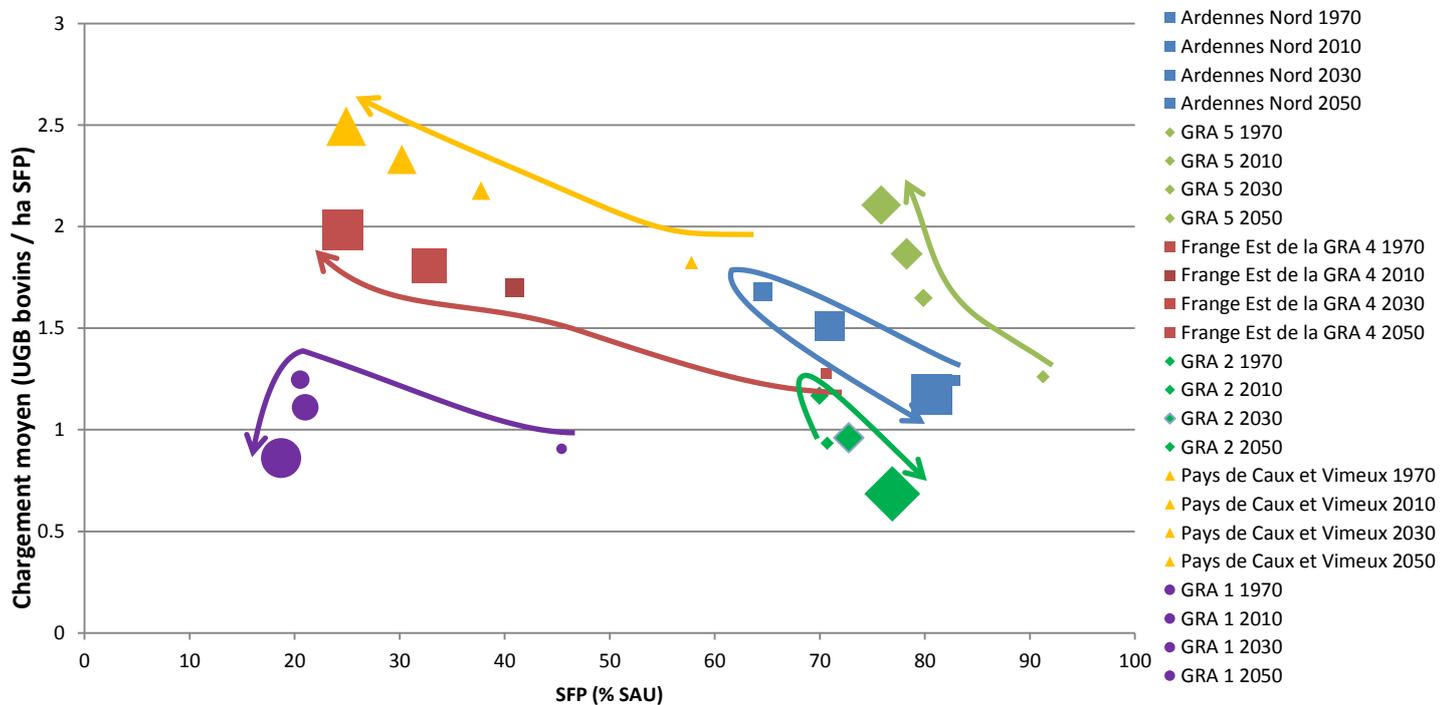


Figure 21 : évolution du chargement bovin (lait, viande et cheptel de renouvellement) en fonction de la surface fourragère régionale pour le ScenA²³

5.5.3 Evolution des systèmes de culture

5.5.3.1 Evolution des assolements

Sur l'ensemble du bassin, les prairies permanentes continuent à perdre de la surface même si la vitesse d'érosion s'est ralentie, passant de 19% de la SAU au début des années 2010 à moins de 15% en 2050. Le colza et les céréales secondaires (orge d'hiver et de printemps principalement) perdent des surfaces au profit du blé tendre, du maïs grain (souvent irrigué) et plus marginalement du tournesol, plus tolérant aux périodes de déficit hydrique, sur les surfaces ne pouvant bénéficier d'irrigation. Les protéagineux représentent moins de 5% de la SAU totale. La Figure 22 présente les principales évolutions d'assolement sur la période 1970 – 2050. L'évolution des surfaces cultivées présentée à l'échelle de l'ensemble du bassin Seine-Normandie cache de fortes hétérogénéités spatiales liées d'une part aux activités d'élevage fortement identitaires de certaines régions du bassin (5.5.2) et d'autre part aux spécificités historiques de certaines régions céréalières. En guise de complément, l'Annexe 3 présente plus en détail l'évolution des assolements déclinée selon chacune des 7 grandes régions agricoles du bassin Seine-Normandie.

²³ Pour respecter la spécificité de certaines régions, il paraissait important d'affiner le découpage des Grandes Régions Agricoles. La définition est la suivante : « Ardennes Nord » (UMA 91, 92 et 93), « GRA 5 »/ « GRA 1 »/ « GRA 2 » (définitions initiales des GRA), « Frange Est de la GRA 4 » (UMA 191, 192, 193, 194 et 195), « Pays de Caux et Vimeux » (UMA 281, 291 et 301). Les autres régions, où l'élevage est moins présent, n'ont pas été représentées. Les flèches représentent les trajectoires des régions telles que proposées dans le scénario.

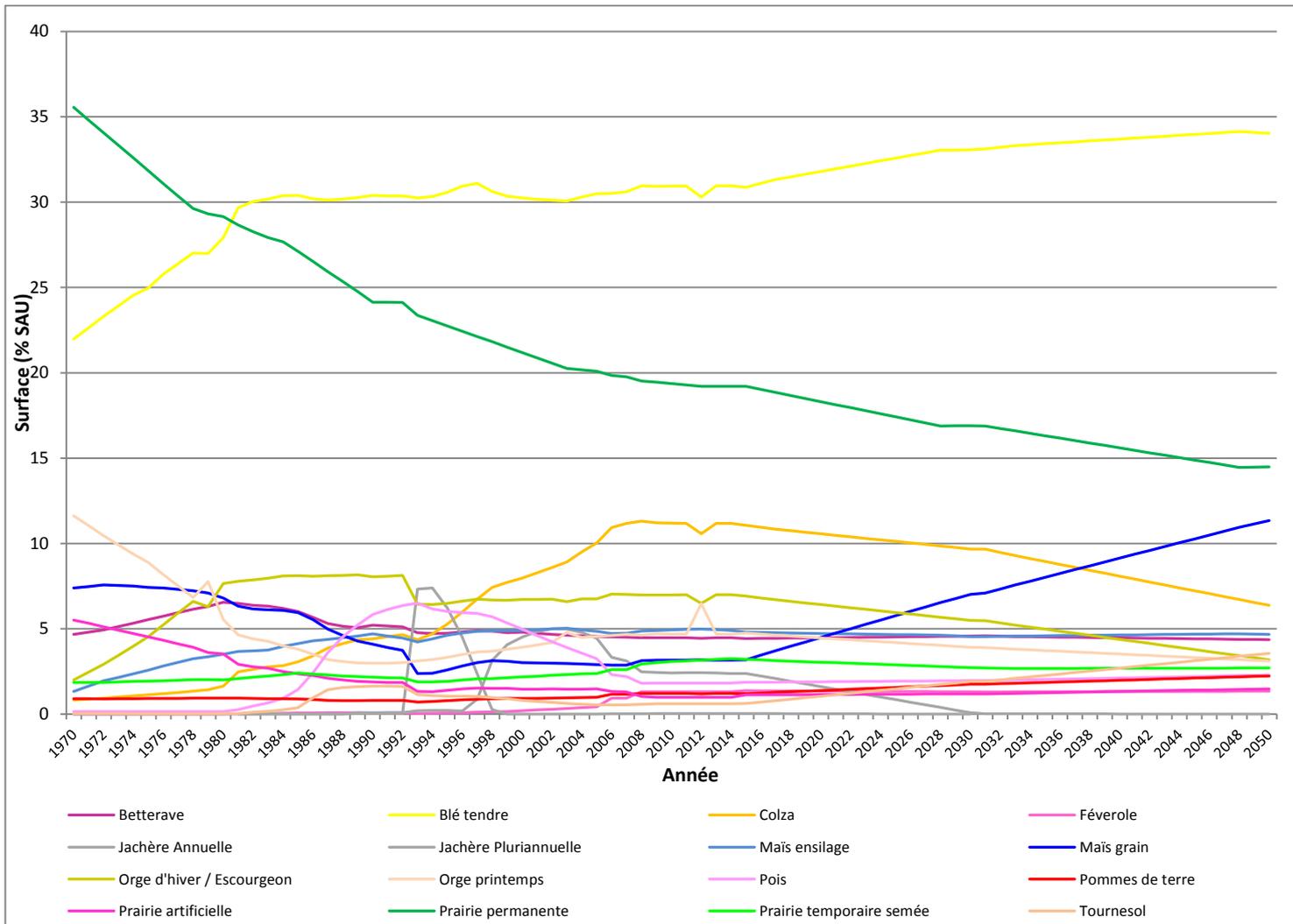
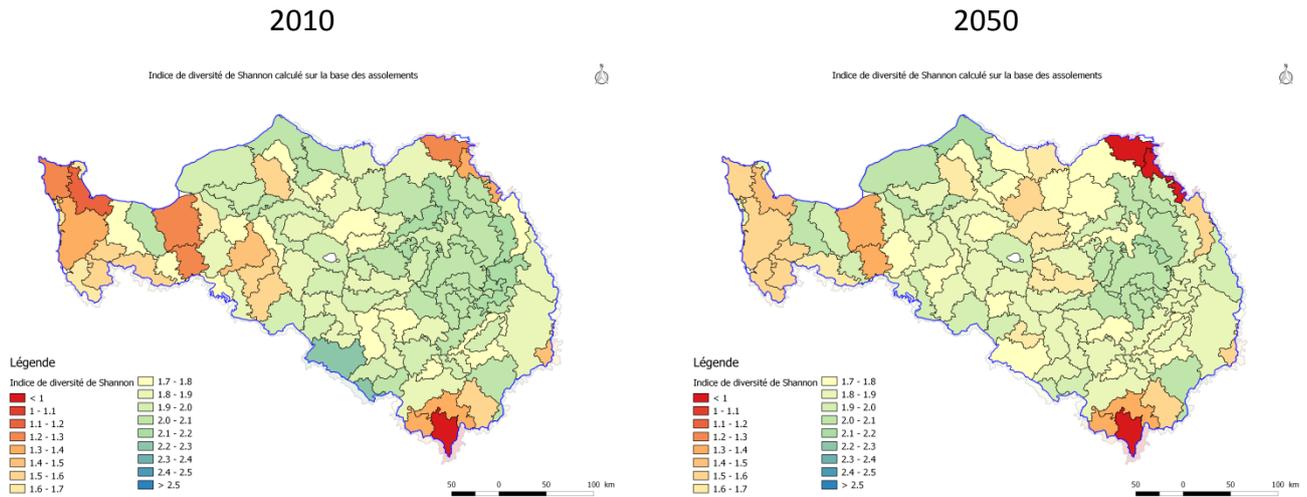


Figure 22 : Evolution de l'assolement du bassin Seine-Normandie dans le cadre du scénario A (1970 – 2050).

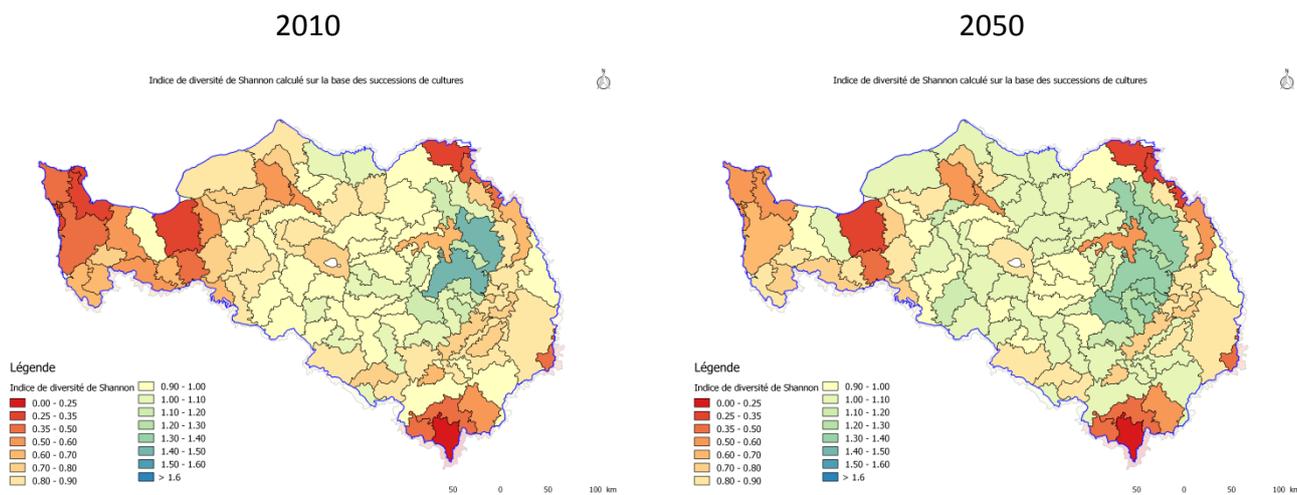
La Carte 15 présente l'évolution de l'indice de diversité des assolements spatialisé à l'échelle des UMA du bassin Seine-Normandie. L'indice de diversité est légèrement à la baisse (-2%) entre 2010 et 2050, avec une baisse plus marquée au centre du bassin (-3.5% pour les GRA 6 et 7) et une légère amélioration de l'indice de diversité dans la GRA 5, liée principalement à la diminution des surfaces en prairies permanentes. Parallèlement, l'indice d'équitabilité de Piélu est en diminution de 4% sur le bassin. Ces deux indicateurs traduisent une simplification des systèmes de culture à travers la réduction de la diversité des espèces cultivées et la domination d'un petit nombre de cultures dans les assolements (blé tendre, maïs grain).



Carte 15 : Evolution de l'indice de diversité des assolements entre 2010 et 2050 d'après le scénario A

5.5.3.2 Diversité des successions de culture

En revanche, la diminution de la diversité des espèces cultivées ne va pas systématiquement de paire avec une diminution de la diversité des successions de cultures. En effet, ce second indicateur permet de décrire la diversité des espèces cultivées au sein d'une même succession culturale (5.2.2.2). La Carte 16 met en évidence une augmentation de la diversité des espèces cultivées au sein d'une même succession culturale (+ 10%). En effet, dans les années 2010, un certain nombre de successions de cultures sont simplifiées avec un petit nombre d'espèces (monocultures, colza-blé-blé, maïs-blé...). Comme décrit dans 5.5.1, ces successions n'ont pas été sans poser un certain nombre de problèmes agronomiques, en particulier au regard de la gestion des adventices. Par conséquent, ces rotations ont été diversifiées (tournesol, pois) pour apporter certaines solutions de lutte agronomique contre les adventices ou les maladies, bien que cette diversification ne permette pas d'inverser les tendances de spécialisation globale des productions végétales sur le bassin.



Carte 16 : Evolution de l'indice de diversité des successions de cultures entre 2010 et 2050 d'après le scénario A

5.5.3.3 Evolution de la fertilisation

Dans ce scénario, la fertilisation minérale du blé tendre est en légère augmentation sur la période 2010-2050 mais cette augmentation reste inférieure à une dizaine d'unités d'azote par hectare sur les 40 dernières années (Figure 23), soit en amplitude quatre fois moins que les évolutions connues entre 1970 et 2010. Cette moyenne cache toutefois de fortes hétérogénéités au sein du bassin. Cette augmentation s'explique d'une part par des conversions de systèmes de production de blés fourragers vers des blés de qualité meunière dans de nombreuses régions où l'élevage recule au profit de systèmes spécialisés à plus forts niveaux d'intrants et d'autre part par le recours de plus en plus fréquent à l'irrigation d'appoint réalisé au centre du bassin (voir paragraphe suivant).

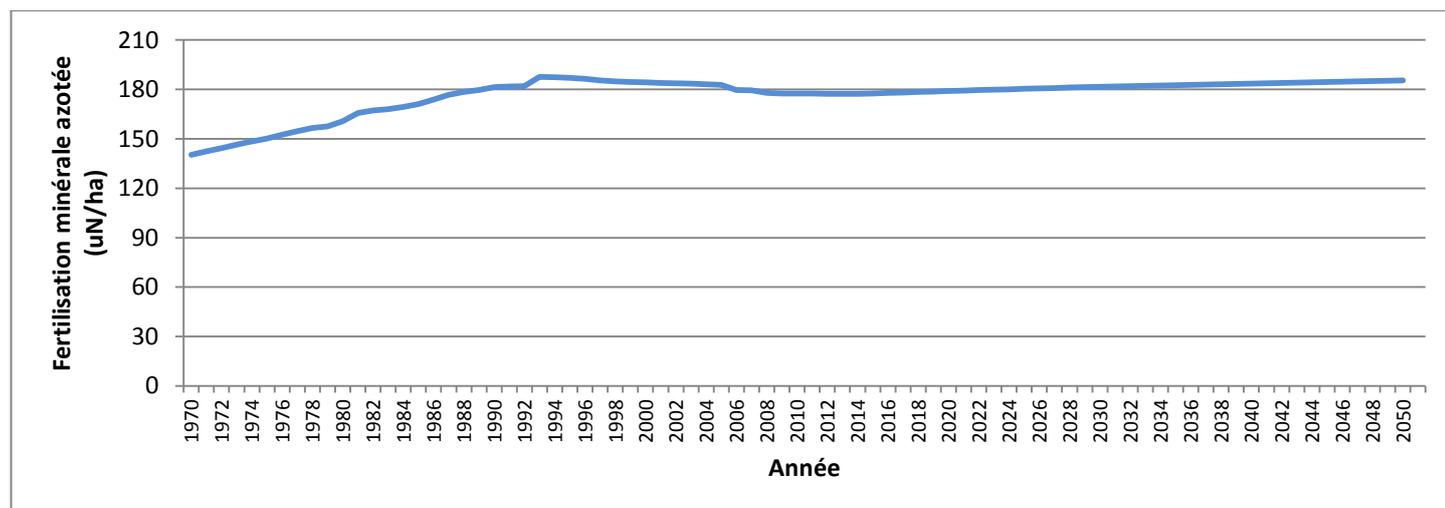
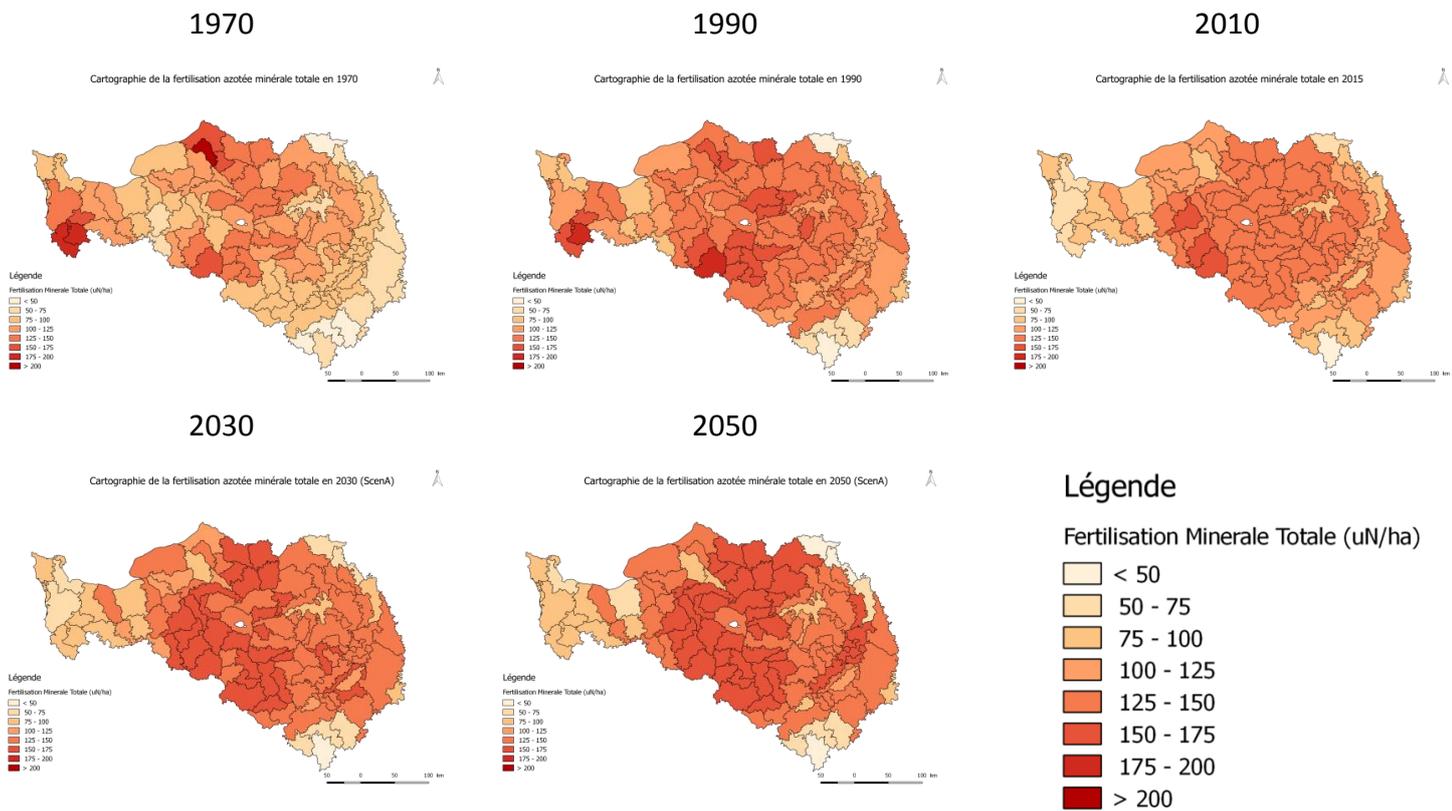


Figure 23 : évolution de la fertilisation minérale azotée sur blé tendre²⁴ (1970 – 2050) d'après le scénario A

²⁴ Hors agriculture biologique

Plus globalement, la fertilisation totale est en augmentation de 10% (Carte 17). Cette augmentation est particulièrement sensible au centre du bassin où le recours à l'irrigation est important (voir paragraphe précédent) et où l'augmentation localement de la fertilisation peut atteindre 25% par rapport à la situation de 2015. Cette augmentation est liée également à la substitution de cultures dont les niveaux de fertilisation sont différents (orge d'hiver substituée par du maïs grain).



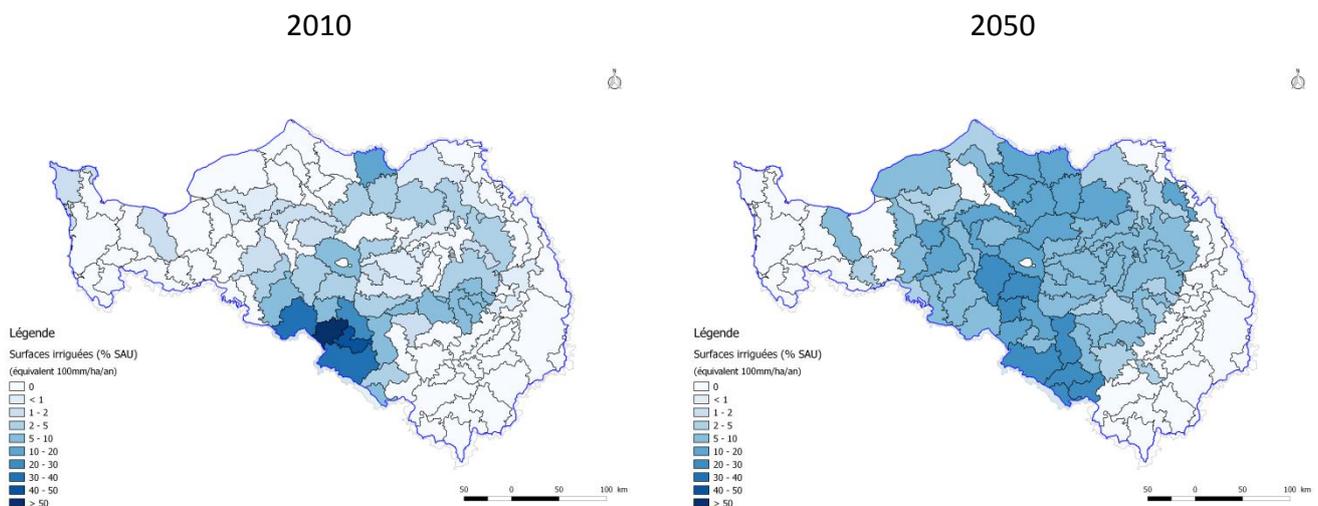
Carte 17 : Evolution de la fertilisation azotée minérale d'après le scénario A

5.5.3.4 Place de l'irrigation dans les systèmes de culture

Dans ce scénario, l'irrigation se développe pour faire face à l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des périodes de stress hydrique. Si dans certaines unités de modélisation agricole situées dans le sud du bassin (en particulier les UMA 131, 164, 123, 122), l'irrigation se réduit à cause d'une raréfaction significative de la ressource, l'irrigation connaît globalement un fort développement sur l'ensemble du bassin et localisée principalement dans les régions où l'eau est disponible en domaine souterrain.

Par conséquent, nous considérons que les retenues collinaires, si toutefois la topographie permet leur développement, ne permettent pas de fournir une quantité significative d'eau pour l'irrigation dans le cadre de ce scénario. Les niveaux de prélèvement d'eau souterraine pour l'irrigation a été définie de manière à limiter la diminution du QMNA5 d'au plus 30% (plus de détails dans la note technique de Viennot et al, 2018). La Carte 18 met en évidence que la majorité des UMA des GRA 1, 2, 3 et 5 n'ont pas recours à l'irrigation, du moins à des niveaux comparables à ceux des autres grandes régions.

A l'échelle du bassin, 6.7 % des surfaces sont irriguées en 2050 (équivalent 100mm/an).



Carte 18 : Evolution des surfaces irriguées (équivalent 100m/an) entre 2010 et 2050 d'après le scénario A

5.6 Scénario B : Un bassin en transition écologique (ScenB)

5.6.1 Quelques éléments de contexte

Le contexte agricole est favorable à la diversification des exploitations. L'agrandissement des exploitations s'est arrêté. Les exploitations diversifient leurs productions, ce qui leur permet d'une part d'être économiquement plus résilientes (vis-à-vis des aléas climatiques toujours présents) et d'autre part de développer l'emploi rural agricole.

Les surfaces en biomasse énergie se développent considérablement. Les anciens systèmes, basés sur une production de masse à très haut niveau d'intrants se maintiennent chez les exploitants les plus réticents.

Le changement se fait progressivement avec l'arrivée des nouvelles générations pour partie issues d'une formation initiale en agriculture et pour partie de reconversions professionnelles.

Les grandes surfaces sont motrices de la transition des exploitations. Les filières se raccourcissent avec une diminution du nombre d'intermédiaire via le développement des circuits courts (AMAP, marchés de producteurs) ou des approvisionnements en local (GMS livrées directement par les producteurs). Les signes de qualité (IGP, AOC, AB) se développent en réponse à une demande croissante de la société. L'engagement des exploitations dans ces dynamiques leur permet d'être plus résilients face aux prix mondiaux des matières premières.

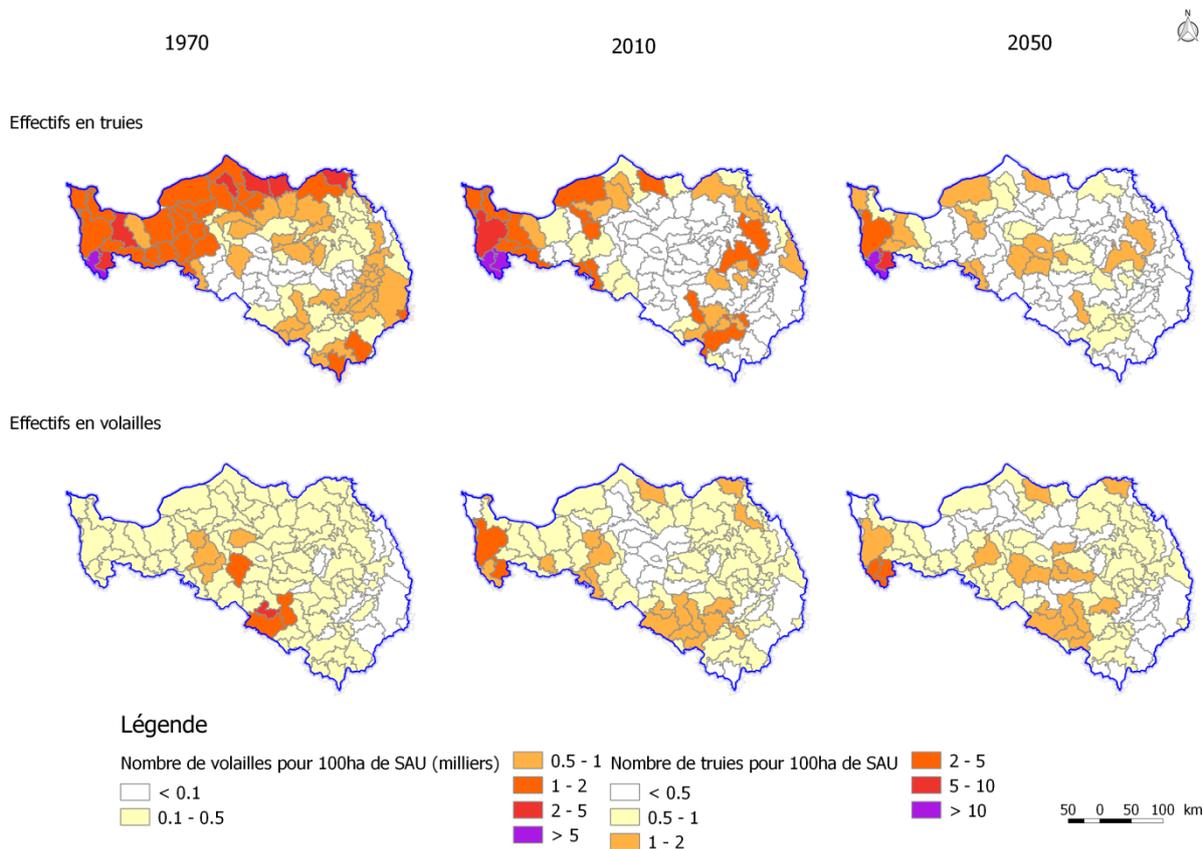
Malgré la baisse globale de la consommation de produits carnés, les activités d'élevage se développent à proximité des zones urbaines (y.c. les villes de taille moyenne) pour satisfaire une demande croissante d'approvisionnement de proximité. Les modes de production font partie intégrante des critères d'achat des consommateurs, aussi les élevages hors-sol ou à forte concentration d'animaux disparaissent progressivement au profit de modes d'exploitation extensifs, principalement basés sur la valorisation des surfaces herbagères, plus robustes vis-à-vis des aléas climatiques. On assiste à un retour progressif de l'élevage dans les régions historiquement céréalières bien que le mode de production dominant reste les grandes cultures. Bien conscientes des limites des rotations triennales à base de cultures d'hiver, les exploitations de grandes cultures se diversifient, à travers l'introduction de cultures de printemps tolérantes à la sécheresse et à faible niveau d'intrants (tournesol, chanvre) mais également de légumineuses.

Les exploitations de l'ouest du bassin se diversifient à la recherche d'autonomie alimentaire, en particulier vis-à-vis des protéines jusqu'alors importées d'Amérique du Sud. Des systèmes à base de luzerne retrouvent toute leur place dans la rotation fourragère.

L'agriculture conventionnelle, qui représente aujourd'hui la quasi-totalité de la SAU du bassin ne représente plus que quelques pourcents en 2050. 40% de la SAU est en agriculture biologique, plus de la moitié est en agriculture intégrée.

5.6.2 L'élevage sur le bassin

Les activités d'élevage bovin reculent globalement sur le bassin (-10% pour les bovins lait, -30% pour les bovins allaitants), excepté dans les régions traditionnellement céréalières du centre du bassin où l'élevage se développe, en particulier autour de l'agglomération parisienne où il répond à une demande croissante de la part de la population francilienne, en particulier au niveau des productions porcines et de volailles (Carte 19 et Carte 20).



Carte 20 : Cartes d'évolution des effectifs de truies et volailles pour le scénario B (1970 – 2010 et 2050).

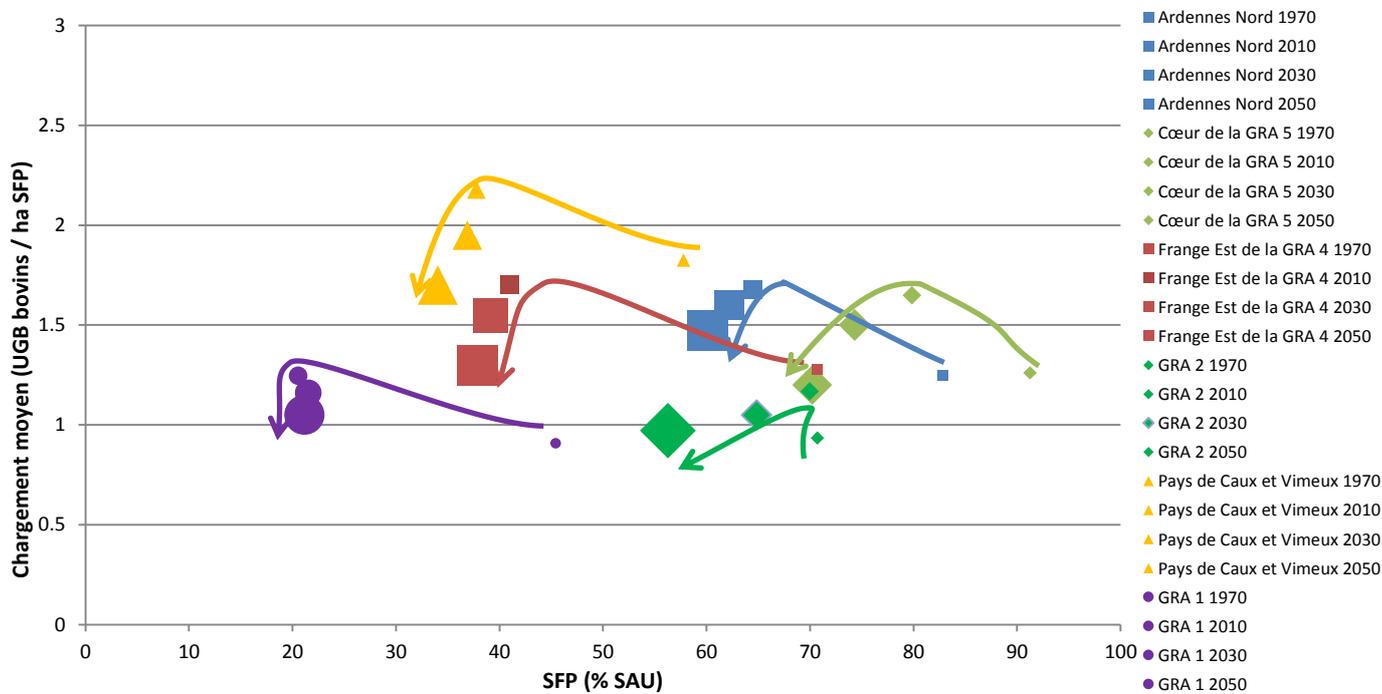


Figure 24 : évolution du chargement bovin (lait, viande et cheptel de renouvellement) en fonction de la surface fourragère régionale d'après le scénario B²³.

5.6.3 Evolution des systèmes de culture

5.6.3.1 Agriculture biologique, agroforesterie et cultures énergétiques

En 2010, l'agriculture biologique représente environ 2% de la SAU du bassin. Dans ce scénario, l'agriculture biologique se développe relativement linéairement et uniformément sur le bassin jusqu'à couvrir 40% de la SAU en 2050. De la même façon, l'agroforesterie se développe jusqu'à atteindre 10% de la SAU en milieu de siècle. Les cultures énergétiques, représentées par le miscanthus, se développent à partir des années 2030 pour représenter, en 2050 plus de 60.000 ha soit environ 1% de la SAU du bassin.

5.6.3.2 Evolution des assolements

A travers le développement généralisé de l'agriculture biologique et de l'agriculture intégrée, les légumineuses fourragères (luzerne) et des protéagineux (pois & féverole principalement) représentent environ ¼ des terres labourables (hors mélanges céréales – protéagineux qui représentent un peu moins de 10% de la SAU en 2050). L'orge d'hiver et le colza, respectivement deuxième et troisième cultures les plus fréquentes dans les années 2010 (avec quasiment 20% de la SAU) sont en net déclin en 2050 pour ne représenter guère plus de 5% cumulé. Le blé tendre (hors mélanges céréales-protéagineux) perd également un peu de terrain. Les prairies permanentes se maintiennent à leur niveau de 2010. Les surfaces en tournesol croissent et sont multipliées par 10 entre 2010 et 2050 (Figure 25). Le tournesol et le sorgho remplacent progressivement le maïs car plus tolérantes aux périodes de stress hydriques (Lecomte et Nolot, 2011).

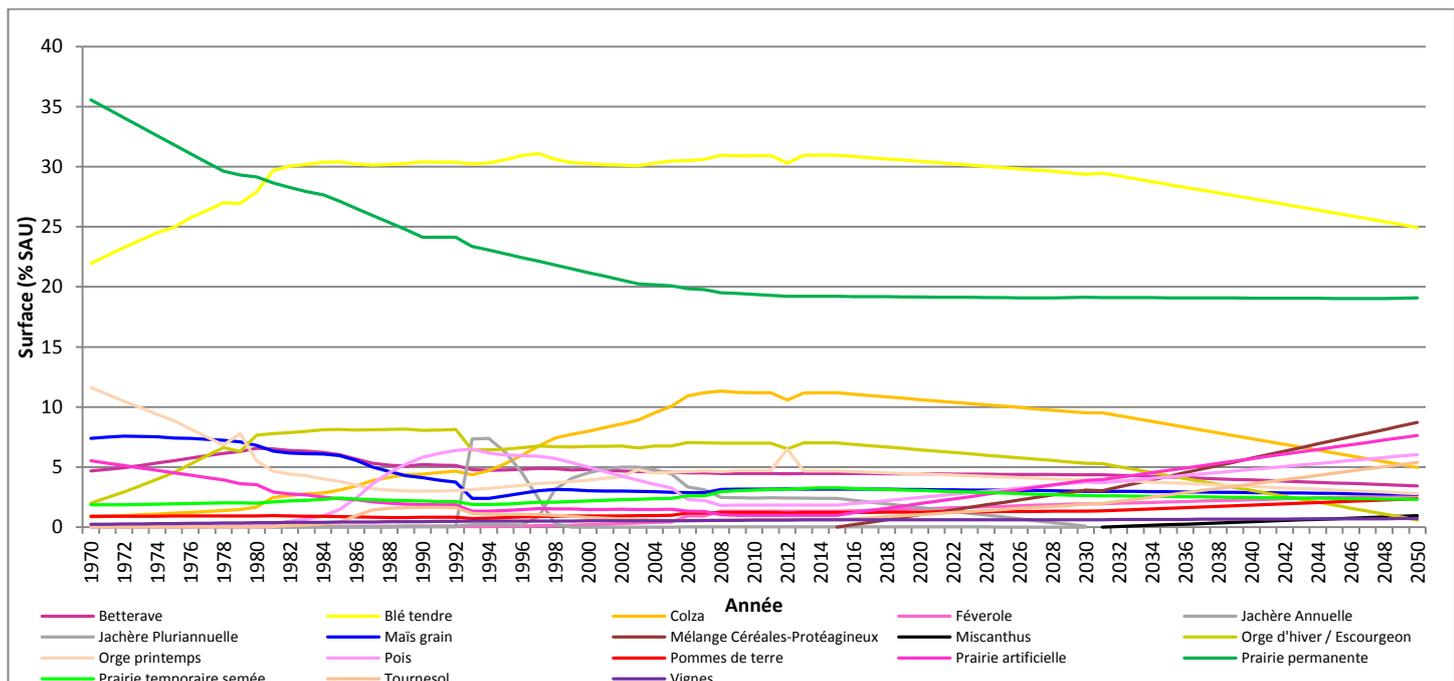
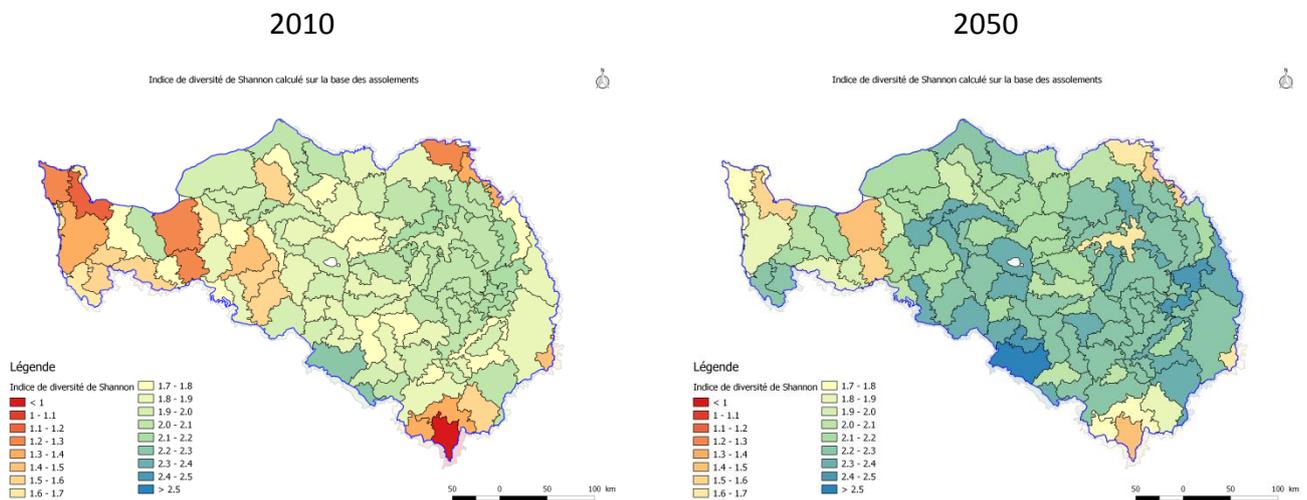


Figure 25 : Evolution de l'assolement du bassin Seine-Normandie dans le cadre du scénario B (1970 – 2050).

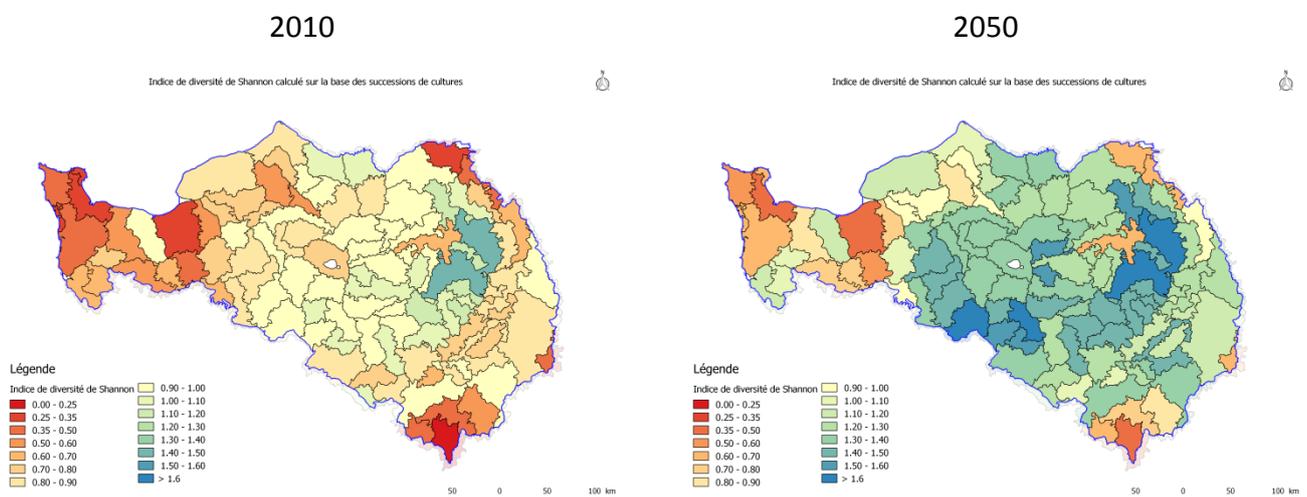
L'indice de diversité des assolements augmente en moyenne de 18% entre 2010 et 2010 (Carte 21) et de 20% par rapport au scénario A. La progression est relativement homogène sur l'ensemble du bassin. A noter cependant que certaines UMA ressortent avec une faible diversité en 2050, lié au fait de leur forte proportion en prairies permanentes (Ardennes, Morvan, Pays d'Auge) ou en vigne (Champagne viticole).



Carte 21 : Evolution de l'indice de diversité des assolements entre 2010 et 2050 d'après le scénario B

5.6.3.3 Diversité des successions de culture

Dans les années 2010, les successions de cultures sont composées en moyenne 4.1 cultures, contre 5.7 pour les successions de cultures en agriculture intégrée et 7.7 en agriculture biologique (dont 2 à 3 ans de luzerne pour la majorité d'entre elles) en 2050 dans le scénario B. Par conséquent, la diversité des successions de cultures augmente de 40% entre 2010 et 2050 (Carte 22) avec une augmentation plus marquée dans les régions historiquement céréalières et dont la fréquence des prairies (ou vignes) est faible (GRA 6 et 7).



Carte 22 : Evolution de l'indice de diversité des successions de cultures entre 2010 et 2050 d'après le scénario B

5.6.3.4 Evolution de la fertilisation

La Figure 26 présente l'évolution de la fertilisation minérale azotée sur blé tendre d'après le scénario B. Contrairement au scénario A où la fertilisation azotée tend à légèrement augmenter, la fertilisation moyenne azotée du scénario B tend à diminuer d'une dizaine d'unités entre 2010 et 2050. Cette diminution est principalement liée à la nature des précédents culturels du blé principalement composés de légumineuses (pois, féverole, luzerne). A noter que la fertilisation azotée minérale moyenne n'est calculée que sur les surfaces fertilisées, excluant les surfaces cultivées en agriculture biologique (en 2050, à l'échelle du bassin, 1/3 des surfaces en blé sont conduites en agriculture biologique donc sans apports d'azote minéral).

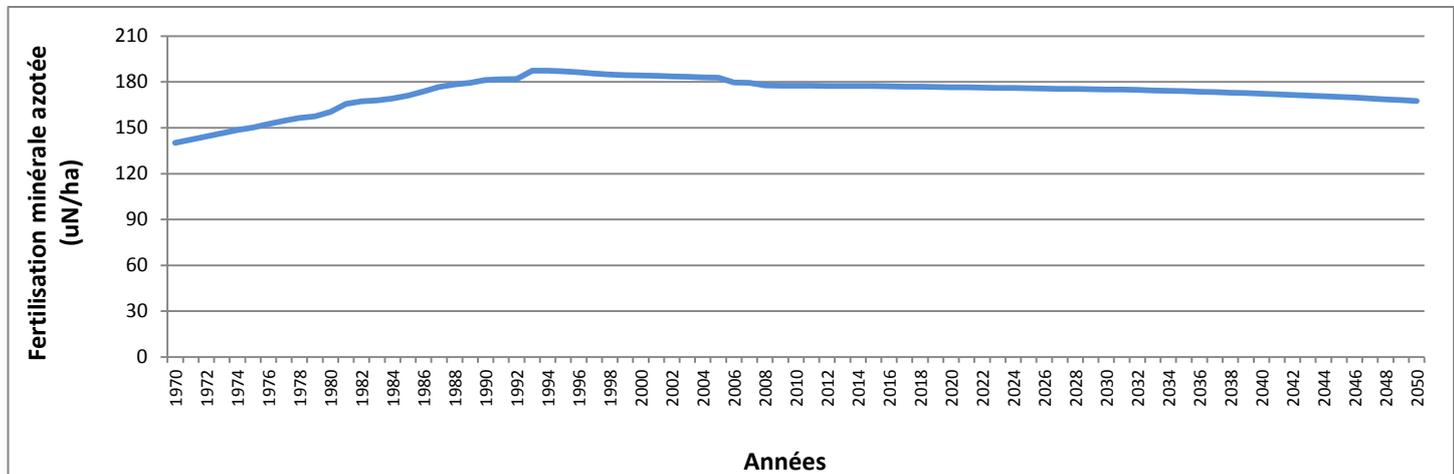
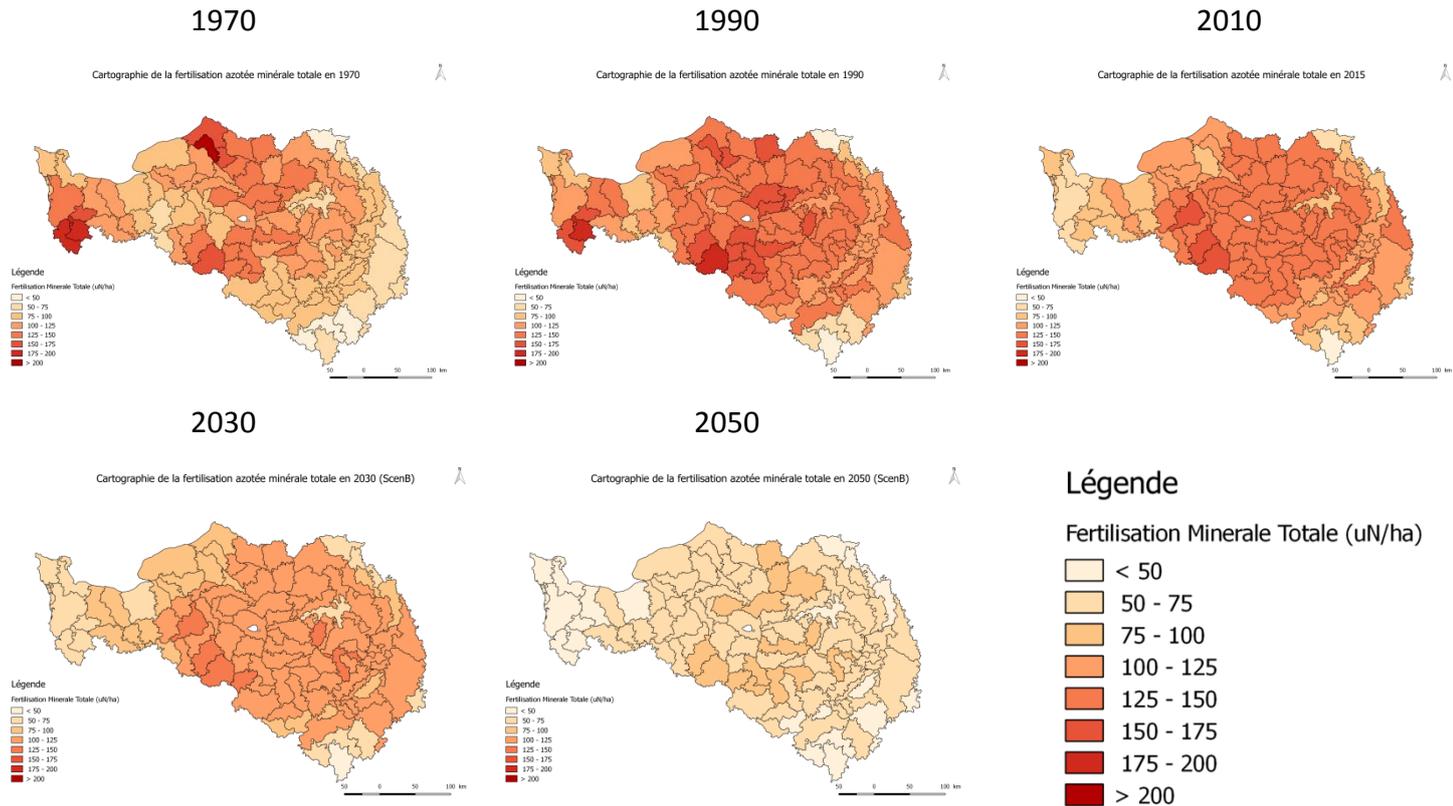


Figure 26 : évolution de la fertilisation minérale sur blé tendre²⁵ (1970 – 2050) d'après le scénario B

Globalement, du fait de la place des systèmes en agriculture biologique et des réductions de fertilisation opéré dans des systèmes an agriculture intégrée, la fertilisation azotée minérale globale moyenne est réduite de 50% à l'échelle de l'ensemble du bassin en 2050 par rapport à la situation de 2015 (Carte 23) et s'élève à une soixantaine d'unités d'azote par hectare cultivé par an.

²⁵ Hors agriculture biologique

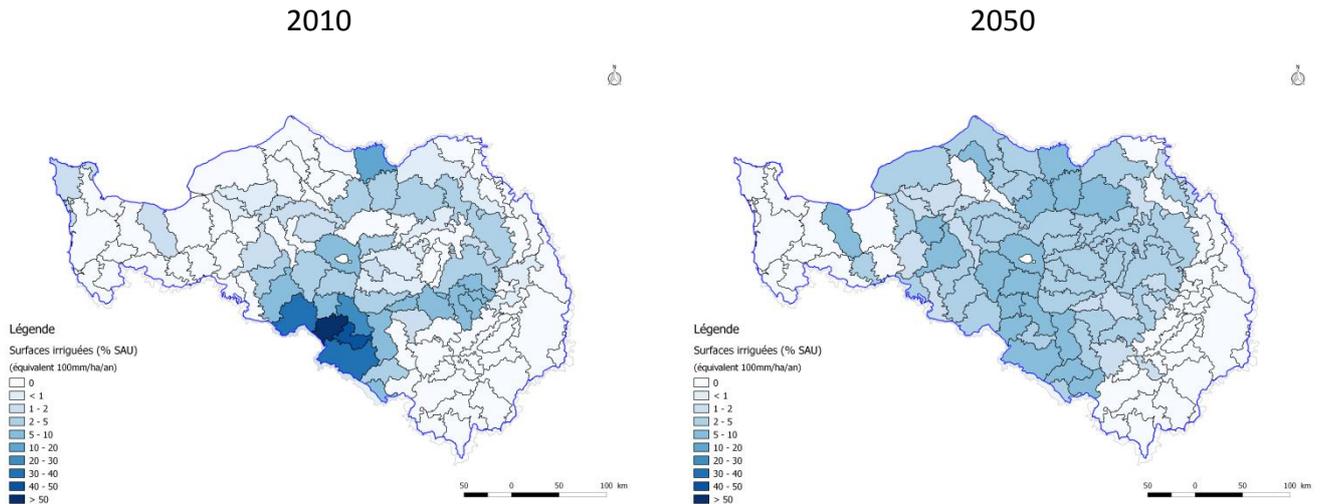


Carte 23 : Evolution de la fertilisation azotée minérale²⁶ d'après le scénario B

5.6.3.5 Place de l'irrigation dans les systèmes de culture

De même que dans le scénario A, l'irrigation tend à se généraliser au centre du bassin, avec un net recul en Beauce et dans le Gâtinais mais une progression en Picardie et en Haute-Normandie. Cette augmentation se fait cependant à un degré moindre que dans le scénario A (3 fois inférieure). Dans ce scénario, l'irrigation est utilisée en appoint (2.5% de la SAU du bassin est irriguée en 2050 – équivalent 100mm/an). L'irrigation est principalement utilisée sur les cultures à forte valeur ajoutée (pommes de terre) et dans une moindre mesure sur les cultures de printemps type betteraves ou maïs grain.

²⁶ Toutes cultures confondues



Carte 24 : Evolution des surfaces irriguées (équivalent 100m/an) entre 2010 et 2050 dans le scénario B

5.7 Limites du travail de prospective

Si le travail conduit a tenté d'intégrer différentes approches (Scénario Afterres 2050 (Solagro, 2016), Prospective AFClm (CEP, 2013), projet Reset (Garnier et al, 2017), il est fondé sur une base principalement agronomique. Il n'a par conséquent pas été raisonné au regard de considérations économiques ou politiques (notamment agricoles). En ce sens, des approches sociologiques, macro-économiques ou politiques sont nécessaires pour mieux environner ces deux scénarii et les replacer dans un contexte socio-politico-économique. Un rapprochement de ce travail avec les travaux du PIREN-Seine pourraient apporter des éléments de contexte globaux pour replacer les scénarii proposés dans un cadre plus large (Poux et Aubert, 2018).

L'objectif de ces deux scénarii est de proposer deux images contrastées de l'agriculture.

- La première se base sur une poursuite des dynamiques de spécialisation, d'intensification et de simplification des systèmes de production tout en tentant d'intégrer les limites actuelles de certains systèmes de culture (notamment ceux basés exclusivement sur des cultures d'hiver) et de prendre en compte les évolutions possibles des conditions climatiques sur le bassin Seine-Normandie.
- La seconde se base sur une évolution plus radicale de l'agriculture du bassin avec une progressive disparition des systèmes actuels au profit de formes d'agriculture biologiques ou intégrées et où l'agroforesterie et les cultures énergétiques prennent une place non négligeable dans le paysage du bassin.

Le contenu de ces deux scénarii ne fait pas l'hypothèse de sauts technologiques majeurs (développement des OGM...) car son contenu se doit de rester compatible avec les modèles existants actuellement pour en évaluer les performances environnementales (Viennot et Gallois, 2017).

Enfin, ce travail de prospective se veut être un support de discussion autour de deux évolutions différentes de l'agriculture du bassin et n'a pas pour vocation d'être prescripteur d'un type d'agriculture sur les territoires.

CONCLUSION

Héritié de travaux conduits depuis près de vingt ans dans le cadre du PIREN-Seine puis avec l'AESN, le présent travail s'est centré sur la caractérisation des différentes formes d'agriculture et de leurs évolutions sur le bassin Seine-Normandie. Si l'objet principal d'étude est le système de culture à travers lequel nous avons étudié les évolutions de structures d'exploitation, d'assolement, de successions culturales et de modes de conduite des cultures depuis 1970, il n'en reste pas moins intégrateur d'une grande diversité de sources d'information mobilisées, en croisant des bases de données nationales avec des enquêtes conduites auprès de plus de 120 acteurs de la profession agricole.

Formalisés dans la base de données Agricole Régionalisée sur le bassin SEIne-NormandiE, ces travaux retracent les évolutions des systèmes de culture depuis le début des années 1970. S'ils ont pour vocation initiale d'alimenter des modélisations environnementales, ces travaux témoignent des processus de spécialisation et d'intensification des productions agricoles en cours depuis une cinquantaine d'années. La vision rétrospective de ces travaux permet d'identifier et de caractériser l'évolution de l'agriculture à travers un certain nombre d'indicateurs valorisables pour des exercices de prospective agricole à moyen terme. Les deux scénarii proposés proposent une vision de l'agriculture tranchée avec une poursuite de l'intensification et de la spécialisation pour le scénario A et une diversification et un fort développement de l'agriculture biologique pour le scénario B. Ces deux scénarii sont basés exclusivement sur des considérations agronomiques et n'intègrent pas de volets politiques, économiques ou sociologiques tant du point de vue des exploitations agricoles que des attentes de la société vis-à-vis de l'agriculture et pourraient en cela alimenter d'autres réflexions conduites sur des bases pluridisciplinaires.

Modélisation des pollutions diffuses d'origine agricole sur le bassin Seine-Normandie

Volume 1/7

Evolution des bases de données pour caractériser les dynamiques des systèmes de culture sur le bassin Seine-Normandie

Annexes

T. PUECH, C. SCHOTT, C. MIGNOLET

thomas.puech@inra.fr, celine.schott@inra.fr, catherine.mignolet@inra.fr

Octobre 2018

INRA-SAD ASTER

662, avenue Louis Buffet, 88 500 MIRECOURT

Référence INRA : RPC n° 12 000 431
N° de convention d'aide AESN : 1 059 507 (1) 2015

Annexe 1 : Construction de la base de données

Objectifs

L'objectif de la base de données est d'offrir un maximum de possibilités à l'utilisateur pour stocker des informations sur les pratiques agricoles du territoire Seine-Normandie. Il doit être possible, de combiner différentes mailles spatiales (communes, UAH, UMA, GRA, etc.). ARSeiNe a été conçu pour offrir la possibilité à l'utilisateur de renseigner des modalités minoritaires au sein d'un itinéraire technique. La base de données doit également répondre aux attentes en termes de qualité d'information nécessaires au bon fonctionnement du modèle STICS (format, précision, etc.).

Ayant vocation à être partagée, la base de données doit pouvoir être accessible à toute personne, même non spécialiste du support de stockage de l'information (Microsoft Access®). Cela implique la création d'une interface minimale pour l'interaction entre l'utilisateur et les données (saisie de successions, d'itinéraires techniques, extraction des données, etc.) : la « simple » lecture de ce document doit suffire à la compréhension et l'utilisation basique de la base de données.

Descripteurs des activités agricoles utilisées dans la base de données

Il est possible de décrire les activités agricoles d'un territoire de deux façons. L'une consiste à se placer au niveau du système de production et de l'exploitation agricole (approche économique), alors que la seconde aborde la question par l'organisation spatiale du territoire en se penchant sur les différents modes d'occupation des terres, décrits par les systèmes de culture.

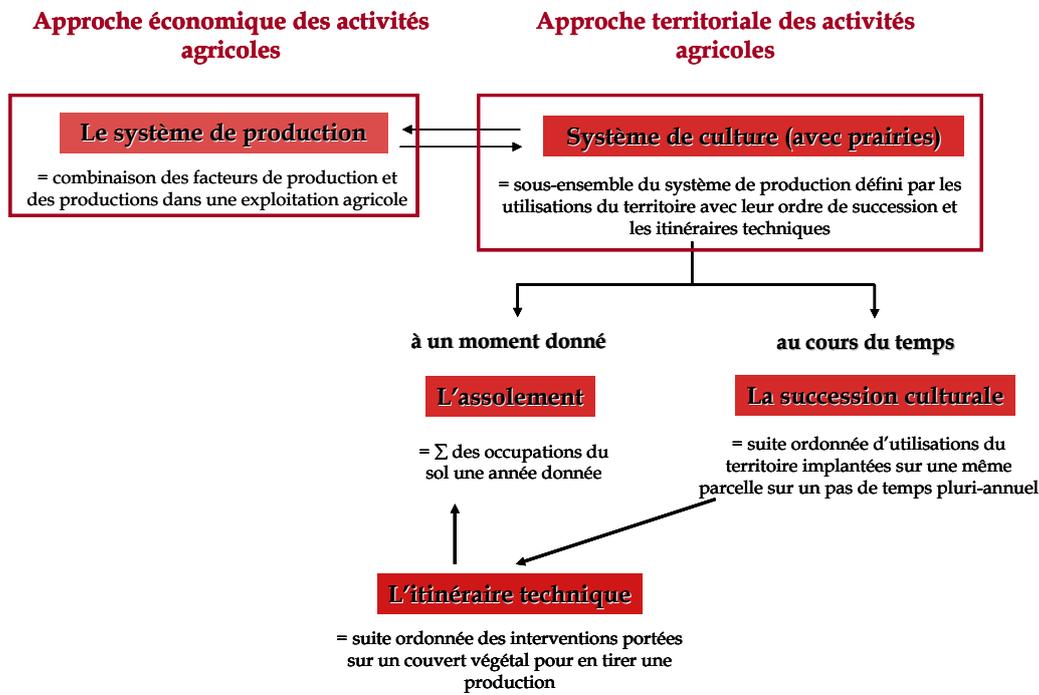


Figure 28 : Schéma des principaux descripteurs des activités agricoles et de leurs relations

Pour la constitution de la base de données concernant les pratiques agricoles à l'échelle du bassin Seine-Normandie, c'est cette seconde approche qui a été privilégiée. En effet, c'est bien la caractérisation spatiale des territoires que l'on souhaite obtenir, et non la caractérisation des exploitations du territoire.

Structure de la base de données

Définition des mailles spatiales

La maille la plus fine possible est la maille communale (9615 communes renseignées). Mais la description des communes de manière unique n'a aucun intérêt pour une caractérisation des activités agricoles à l'échelle régionale. On utilisera les emboitements d'échelle décrits par Puech et al, 2015 et rappelés dans le paragraphe 1.3.

Dans la table « maille_definition » (Tableau 14), on attribue à chaque commune du bassin Seine-Normandie une Unité Homogène Agricole (unité spatiale élémentaire issue du découpage des PRA, non présentée), une Unité de Modélisation Agricole et une Grande Région Agricole.

On renseigne également d'autres informations qui n'ont pas d'intérêts spécifiques dans la base de données mais qui peuvent être intéressantes car sont organisées de manière indépendantes des unités spatiales décrites dans la base de données. On y retrouve des informations administratives (N° de canton [CANTON], de département [DEP], de région [REG]), des informations règlementaires (zones vulnérables nitrates [ZV_nitrates]) ou des informations agricoles (petites régions agricoles [PRA], surface de la commune

[Surface_totale], surface agricole utile [SAU], surfaces drainées – moyenne cantonale [drainage] et surfaces irriguées – moyenne cantonale [irrigation]).

La table « maille_description » (Tableau 15) apporte une information sur le nom des UMA.

Nom du champ	Format	Description
INSEE_COM²⁷	Texte 5 (clé primaire)	Identifiant unique des numéros de commune selon la nomenclature INSEE
Id_UAH	Texte 50	Identifiant du premier niveau de regroupement en unité agricole homogène
Id_UMA	Texte 50	Identifiant du second niveau de regroupement en Unité de Modélisation Agricole
Id_GRA	Texte 50	Identifiant du troisième niveau de regroupement en Grande Région Agricole
CANTON	Texte 50	Numéro INSEE du canton
DEP	Texte 50	Numéro INSEE de département
REG	Texte 50	Numéro INSEE de la région
PRA	Texte 50	Numéro de la petite région agricole
ZV_nitrates	Texte 50	Classement 2011 en zone vulnérable nitrates ou non
Surface_totale	Entier long	Surface totale de la commune (ha)
SAU	Entier long	Surface agricole utile (ha)
Drainage	Entier	Superficie drainée (% SAU)
Irrigation	Entier	Superficie irriguée (% SAU)

Tableau 14 : ARSEINE : Structure de la table maille_definition

Nom du champ	Format	Description
Id_UMA	Texte 50	Numéro de l'UMA
Nom_maille	Texte 50	Nom de l'UMA

Tableau 15 : ARSEINE : Structure de la table maille_description

Référencement des acteurs enquêtés

Dans la précédente version de la base de données, les acteurs enquêtés étaient référencés dans la table « maille_description ». Or, la structuration actuelle, en particulier avec l'ajout d'une dimension temporelle supplémentaire rend l'exploitation de cette structure plus délicate à utiliser (un expert peut être référencé sur une ou plusieurs périodes, une ou plusieurs régions), d'où l'ajout de la table « expert_description » (Tableau 16).

Nom du champ	Format	Description
Id_expert	Entier long	Numéro de l'expert
Id_UMA	Texte 50	Numéro de l'UMA
Periode	Texte 50	Période temporelle

Tableau 16 : ARSEINE : Structure de la table expert_description

Chaque expert est ensuite référencé dans la table « expert_definition » (Tableau 17).

²⁷ Les clés primaires figurent en gras.

Nom du champ	Format	Description
id_expert	Entier long	Numéro de l'expert
nom_expert	Texte 50	Nom
prenom_expert	Texte 50	Prénom
institution	Texte 50	Institution (chambre agriculture, CETIOM...)
fonction	Texte 50	Fonction au sein de la structure (chef de service, technicien...)
mail	Texte 50	Mail
telephone_fixe	Texte 50	N° téléphone fixe
telephone_mobile	Texte 50	N° téléphone portable
page_web	Texte 50	Page web
adresse	Texte 50	Adresse physique
detail_contact	Texte 50	Traçabilité des échanges
titre	Texte 50	Monsieur / Madame
resume	Texte 50	Synthèse de l'entretien

Tableau 17 : ARSEINE : Structure de la table expert_description

Pour des raisons d'anonymisation et de secret professionnel, le contenu de la table « expert_description » a été résumé à l'identifiant (id_expert) de l'expert et son institution de rattachement au moment de l'enquête.

Description des activités d'élevage

Comme précisé précédemment, la base de données est focalisée sur les systèmes de culture et non les systèmes d'élevage. Cependant, bien que les activités d'élevage soient intégrées de manière très indirecte via les itinéraires techniques, il peut être intéressant, pour la validation de certaines données (en particulier sur la fumure organique), d'avoir une description factuelle des activités d'élevage (Tableau 18 et Tableau 19). Le contenu de ces tables est facultative (la base de données peut fonctionner sans que ces tables soient renseignées).

Nom du champ	Format	Description
Id_UMA	Texte 50	Numéro de l'UMA
Id_elevage	Texte 50	Identifiant élevage
Annee	Entier long	Année
Effectif	Entier long	Effectif ou quantité

Tableau 18 : ARSEINE : Structure de la table elevage_description

Nom du champ	Format	Description
Id_elevage	Texte 50	Identifiant élevage
Nom	Texte 50	Description de la catégorie
Quantité_unitaire_effluents	Entier long	Quantité unitaire d'effluents émis

Tableau 19 : ARSEINE : Structure de la table elevage_definition

Définition des liens entre successions et types de sols

Il est possible de spécifier (voir la partie 3) un lien entre type de sol et successions culturales. Ce lien est assuré par les tables « sol_definition » et « sol_description ». Le renseignement de ces tables est facultatif.

Nom du champ	Format	Description
Id_UMA	Texte 50	Numéro de l'UMA
UCS	Texte 50	Numéro de l'UCS (peut faire référence à un fichier de formes SIG)
surface	Entier long	Fréquence de l'UCS dans l'UMA

Tableau 20 : ARSEINE : Structure de la table sol_definition

Nom du champ	Format	Description
Id_UMA	Texte 50	Identifiant l'UMA
UCS	Texte 50	Numéro de l'UCS (peut faire référence à un fichier de formes SIG)
Annee	Entier long	Année
Id_succession	Entier long	N° de succession
DeltaSurface	Entier long	Différence de surface entre la fréquence de la succession dans l'UMA et sa fréquence dans l'UCS

Tableau 21 : ARSEINE : Structure de la table sol_description

Note : dans la table « sol_description », la notion quantitative [DeltaSurface] est exprimée en relatif vis-à-vis de la fréquence de la succession dans l'UMA, de manière à (i) rappeler que les systèmes de culture sont définis à l'échelle de l'UMA et (ii) il est plus simple de raisonner en relatif (par rapport à la base d'assolement de rotations de l'UMA) plutôt qu'en absolu.

Définition des successions de cultures

Dans la structure de la base de données, les successions sont classées en 2 catégories : les « successions de base » et les « successions de transition ».

- Les catégories de successions
 - Les successions de base

Ces successions sont héritées de l'ancienne structuration de la base de données où chaque succession avait une fréquence définie et constante sur toute la période homogène. Les successions « de base » représentent dans la nouvelle structure, ce que l'on pourrait qualifier d'état initial de l'UMA la première année de la période homogène. Par conséquent, chaque succession de base a une fréquence non nulle la première année. La fréquence pouvant varier par la suite.

- Les successions de transition

Elles correspondent à un apport méthodologique conséquent de cette version de la base de données. Ces successions ont une fréquence nulle la première année de la période homogène (par construction et sauf cas exceptionnel des successions de dirac explicitement référencées comme non nulles la première année de la période homogène). Elles sont définies par un ensemble de paramètres regroupés dans la table succession_transition qui vont définir l'évolution de leur fréquence au cours des années de la période homogène.

- La définition des successions

Chaque succession, qu'elle soit de base ou de transition est définie dans la table succession_definition (Tableau 22).

Nom du champ	Format	Description
Id_succession	Entier long	Numéro de la succession
Id_UMA	Texte 50	Numéro de l'UMA décrite par la succession
Surface	Entier long	Fréquence de la succession dans l'UMA (%)
debut_pperiode	Entier long	Année de début de la période de définition
fin_pperiode	Entier long	Année de fin de la période de définition
Remarques	Mémo	Remarques éventuelles sur la succession
succession_transition	Boolean (oui/non)	Identifie les successions de transition (True) des successions de base (False)
AgriBio	Boolean (oui/non)	Identifie les successions en agriculture biologique (True) ou non (False)
AgroForesterie	Boolean (oui/non)	Identifie les successions en agroforesterie (True) ou non (False)

Tableau 22 : ARSEINE : Structure de la table succession_definition

- La caractérisation des successions de transition

La nature des transitions des successions de transition sont définies dans la table succession_transition (Tableau 23).

Nom du champ	Format	Description
Id_succession	Entier long	Numéro de la succession
Num_ordre	Entier long	Numéro d'ordre de la transition
Type_transition	Texte (50)	Type de transition
Parametre1	Texte (50)	Paramètre n°1
Parametre2	Texte (50)	Paramètre n°2
Parametre3	Texte (50)	Paramètre n°3
Parametre4	Texte (50)	Paramètre n°4
Parametre5	Texte (50)	Paramètre n°5
Parametre6	Texte (50)	Paramètre n°6
Parametre7	Texte (50)	Paramètre n°7

Tableau 23 : ARSEINE : Structure de la table succession_transition

Le sens des paramètres dépend du type de transition. Le Tableau 24 recense les paramètres et leur sens en fonction des types de transition.

Type de transition	Fréquence de la succession une année n quelconque	N° du paramètre	Sens du paramètre
Linéaire	$p2*(n-n_i)$	p1	N° de succession substituée
		p2	%SAU apparaissant chaque année
Exponentielle	$(Exp(n-n_i-1)-1)/(Exp(n_f-n_i-1))*p2$	p1	N° de succession substituée
		p2	%SAU apparaissant la dernière année de la période
Transformation linéaire de A en B	0 si $n=n_i$ ou si $n=n_f$ $(x_t-n-n_i)*p3/(n_f-n_i-x_t)$ si $n-n_i < x_t$ $(x_t-n_f-n)*p3/(n_f-n_i-x_t)$ si $n_f-n < x_t$ $x_t*p3/(n_f-n_i-x_t)$ si $n-n_i \geq x_t$ et $n_f-n \geq x_t$	p1	N° de succession substituée
		p2	N° de succession implémentée
		p3	%SAU convertie sur la période
Sigmoidale	$p2/(1+Exp(-1*p5*(n-p3)))$	p1	N° de succession substituée
		p2	%SAU maximum
		p3	Année d'atteinte de 50% de p2
		p4	Durée qualitative de transition (=aide à la saisie de p5)
		p5	Paramètre numérique de durée de transition
Normale	0 si $n < n_i$ ou $n > n_f$ $Exp(-((n-n_i-p7)^2)/p6*p5)*p6$ si $n_i \leq n \leq n_f$	p1	N° de succession substituée
		p2	Année de début du phénomène éphémère
		p3	Année de début du phénomène éphémère
		p4	Durée qualitative durant laquelle la fréquence de la succession > 50% p6 (aide à la saisie de p5)
		p5	Variance
		p6	Fréquence maximale
		p7	Année d'atteinte du maximum
De dirac	$p3$ si $n=p2$ 0 sinon	p1	N° de succession substituée
		p2	Année du phénomène
		p3	% SAU l'année n

Soient : n_i la 1^{ère} année et n_f la dernière de la période homogène, x_t le nombre de cultures dans la succession de transition

Tableau 24 : ARSEINE : caractérisation des types de transition

La fréquence des successions pouvant varier dans le temps, la table « succession_transition_temp » référence la fréquence de chaque succession de cultures à l'échelle de l'année (Tableau 25). Cette table doit être remise à jour (voir ci-après les procédures automatisées) après chaque modification des paramètres des successions de transition.

Nom du champ	Format	Description
Annee	Entier long	Année
Id_succession	Entier long	Numéro de la succession
surface	Réel double	Fréquence de la succession en % de SAU

Tableau 25 : ARSEINE : Structure de la table succession_transition_temp

Description des cultures et de leurs successions

Chaque système de culture est défini par une succession ordonnée de cultures dans le temps à laquelle un itinéraire technique est appliqué (travail du sol, fertilisation...). Les successions de cultures sont caractérisées dans la table « succession_description » (Tableau 31). Cette table définit le cœur du système d'information puisqu'elle couple définition des successions de cultures et leurs itinéraires techniques associés.

Nom du champ	Format	Description
id_succesion	Entier long	Numéro de la succession
num_ordre	Entier long	Numéro d'ordre de la culture dans la succession
id_culture	Entier long	Identifiant de la culture
id_travail_sol	Entier long	Identifiant du travail du sol
id_ferti	Entier long	Identifiant de la fertilisation
id_phyto	Entier long	Identifiant du programme phytosanitaire
id_interculture	Entier long	Identifiant de la gestion du couvert intermédiaire
id_irrigation	Entier long	Identifiant de la gestion de l'irrigation
id_prairie	Entier long	Identifiant du mode de gestion spécifique aux prairies
id_vigne	Entier long	Identifiant du mode de gestion spécifique à la vigne

Tableau 26 : ARSEINE : Structure de la table succession_description

La table « culture_description » (Tableau 27) définit la nature technique de la culture.

Nom du champ	Format	Description
id_culture	Entier long	Identifiant de la culture
type_culture	Texte 50	Nature de la culture (nom simplifié)
rendement_min	Entier long	Rendement minimum (qtx.ha ⁻¹)
rendement_moy	Entier long	Rendement moyen (qtx.ha ⁻¹)
rendement_max	Entier long	Rendement maximal (qtx.ha ⁻¹)
ecart_type_rendement	Réel simple	Ecart type des rendements (qtx.ha ⁻¹)
date_semis	Entier long	Date de semis (en jour julien, base 365j)
date_recolte	Entier long	Date de récolte (en jour julien, base 365j)
densite_semis	Entier long	Densité de semis (en grains.m ⁻²)
pailles_enfouies	Oui/Non	Oui si les pailles <u>de la culture</u> sont restituées, non sinon

Tableau 27 : ARSEINE : Structure de la table culture_description

Les champs codés avec « 999 » représentent l'absence d'information.

Enfin la table « culture_definition » permet de faire la relation entre le code culture utilisé et le nom de la culture. Toute culture doit être renseignée dans la table culture_definition avant d'être référencée dans les successions d'ARSEINE.

Nom du champ	Format	Description
type_culture	Texte 50	Nature de la culture (nom simplifié)
nom_culture	Texte 50	Nom complet de la culture

Tableau 28 : ARSEINE : Structure de la table culture_definition

Les itinéraires techniques

La base de donnée offre la possibilité à l'utilisateur de renseigner des pratiques minoritaires par itinéraire techniques (exemple : « seuls 10% des blés conduits selon cet itinéraire technique sont labourés »).

Pour chaque poste d'itinéraire technique (fertilisation, travail du sol, etc.), on associe une table intermédiaire. Cette table permet la mise en place d'un certain nombre de modalités d'itinéraires techniques, chacune de ces modalités étant plus ou moins fréquente ([SAU_concernee] qui correspond à la fréquence de chaque modalité).

Tous les postes d'itinéraire technique (fertilisation, travail du sol, irrigation, interculture, gestion des prairies et gestion de la vigne) sont gérés sous le même modèle. Aussi il est conseillé de lire ce chapitre de manière linéaire.

- Le travail du sol

Une culture (qu'elle soit pérenne ou non) peut être conduite selon différentes modalités. La nature des modalités de travail du sol sont renseignées dans la table « travail_sol_definition » (Tableau 29). Pour chaque combinaison de travaux du sol, l'utilisateur peut mettre autant de passage qu'il souhaite.

Nom du champ	Format	Description
type_travail_sol	Texte 50	Nature (simplifiée) de l'opération de travail du sol
nom_travail_sol	Texte 50	Nom complet de l'opération de travail du sol
profondeur	Entier long	Profondeur par défaut de l'opération culturale (en cm)

Tableau 29 : ARSEINE : Structure de la table travail_sol_definition

Chaque combinaison logique de travail du sol (pouvant représenter aucune, une ou plusieurs opération de travaux du sol, de nature identique ou différente) est définie dans la table « travail_sol_description » (Tableau 30).

Nom du champ	Format	Description
id_combi_travail_sol	Entier long	Identifiant élémentaire du travail du sol
num_ordre	Entier long	Numéro d'ordre de l'opération de travail du sol
type_travail_sol	Texte 50	Nature (simplifiée) de l'opération de travail du sol
date_min	Entier long	Date minimale de l'opération de travail du sol (en jour julien base 365j)
date_moy	Entier long	Date moyenne de l'opération de travail du sol (en jour julien base 365j)
date_max	Entier long	Date maximale de l'opération de travail du sol (en jour julien base 365j)
profondeur	Entier long	Profondeur du travail du sol (en cm)

Tableau 30 : ARSEINE : Structure de la table travail_sol_description

Un itinéraire technique de travaux du sol est défini par une ou plusieurs combinaisons logiques d'opérations élémentaires. La table « travail_sol » (Tableau 31) regroupe les différentes combinaisons (ou variantes) d'un même itinéraire technique, chacune de ces combinaisons étant quantifiée par une fréquence au sein de l'ITK. La majorité des ITK ont une seule combinaison d'opérations élémentaires.

Nom du champ	Format	Description
id_travail_sol	Entier long	Identifiant du travail du sol
id_combi_travail_sol	Entier long	Identifiant de la combinaison d'opérations de travaux du sol
sau_concerne	Entier long	Fréquence de la combinaison (en % de l'itinéraire technique)

Tableau 31 : ARSEINE : Structure de la table travail_sol

L'imbrication de logiques telle que décrite précédemment est conservée telle que pour les autres postes de l'itinéraire technique.

- La fertilisation

Dans les bases de données précédentes, la fertilisation organique et la fertilisation minérale étaient renseignées dans des tables distinctes. L'organisation de la base de données permet d'associer les deux types de fertilisation dans une même structure de tables.

Ainsi, la table « ferti_definition » recense les types de fertilisants possibles (Tableau 32). La table « ferti » décrit les combinaisons logiques de fertilisation (Tableau 34) et la table « ferti_description » définit les modalités techniques de ces combinaisons logiques (Tableau 33).

Nom du champ	Format	Description
id_fertilisant	Texte 50	Nature (simplifiée) du fertilisant
nom	Texte 50	Nom complet du fertilisant
type	Texte 50	Type de fertilisant (minéral ou organique)
teneur N	Texte 50	Teneur en azote
code residu STICS	Texte 50	Codification spécifique à STICS

Tableau 32 : ARSEINE : Structure de la table ferti_definition

Nom du champ	Format	Description
id_combi_ferti	Entier long	Identifiant élémentaire de la fertilisation
num_ordre	Entier long	Numéro d'ordre de l'opération de fertilisation
id_fertilisant	Texte 50	Nature (simplifiée) du fertilisant
date_min	Entier long	Date minimale de l'opération de fertilisation (en jour julien)
date_moy	Entier long	Date moyenne de l'opération de fertilisation (en jour julien)
date_max	Entier long	Date maximale de l'opération de fertilisation (en jour julien)
quantite	Réel simple	Quantité apportée (uN.ha ⁻¹ pour les fertilisants minéraux, t.ha ⁻¹ pour les fertilisants organiques)

Tableau 33 : ARSEINE : Structure de la table ferti_description

Nom du champ	Format	Description
id_ferti	Entier long	Identifiant de la fertilisation
id_combi_ferti	Entier long	Identifiant élémentaire de la fertilisation
sau_concerne	Entier long	% de surface concerné par l'identifiant élémentaire

Tableau 34 : ARSEINE : Structure de la table ferti

- Les convertis d'interculture

Le poste interculture permet de décrire l'occupation du sol entre la récolte du précédent cultural et le semis de la culture. La présence d'une culture intermédiaire (ou dérobée) se doit d'être intégrée au sein d'un itinéraire technique, et non en tant que culture en tant que telle dans la succession de cultures. La table « interculture_definition » définit les types de couverts possibles en interculture (y.c. l'absence de couverts) (Tableau 35). La table « interculture_description » définit les modalités techniques des combinaisons de gestion des cultures intermédiaires (Tableau 36) et enfin la table « interculture » recense les différentes combinaisons possibles des modes de gestion de chaque itinéraire technique (Tableau 37).

Nom du champ	Format	Description
type_interculture	Texte 50	Nature (simplifiée) du couvert intermédiaire
nom	Texte 50	Nom complet du couvert intermédiaire
fixation_azote	Entier long	Quantité d'azote fixé (uN.ha ⁻¹)
etat_developpement	Texte 50	Etat de développement du couvert à sa destruction

Tableau 35 : ARSEINE : Structure de la table interculture_definition

Nom du champ	Format	Description
id_combi_interculture	Entier long	Identifiant élémentaire la gestion du couvert intermédiaire
type_interculture	Texte 50	Nature (simplifiée) du couvert intermédiaire
date_implantation_min	Entier long	Date d'implantation minimale du couvert (en jour julien)
date_implantation_moy	Entier long	Date d'implantation moyenne du couvert (en jour julien)
date_implantation_max	Entier long	Date d'implantation maximale du couvert (en jour julien)
date_destruction_min	Entier long	Date de destruction minimale du couvert (en jour julien)
date_destruction_moy	Entier long	Date de destruction moyenne du couvert (en jour julien)
date_destruction_max	Entier long	Date de destruction maximale du couvert (en jour julien)
etat_developpement	Texte 50	Etat de développement du couvert à sa destruction
rendement_si_exporte	Entier long	Rendement des couverts dérobés (en t.ha ⁻¹)

Tableau 36 : ARSEINE : Structure de la table interculture_description

Nom du champ	Format	Description
id_interculture	Entier long	Identifiant de la gestion du couvert intermédiaire
id_combi_interculture	Entier long	Identifiant élémentaire la gestion du couvert intermédiaire
sau_concerne	Entier long	% de surface concerné par l'identifiant élémentaire

Tableau 37 : ARSEINE : Structure de la table interculture

- L'irrigation

Dans les bases de données précédentes, l'irrigation n'était pas intégrée comme faisant partie à part entière de l'itinéraire technique d'une culture. Le choix a été fait de l'intégrer dans ARSEiNe. La table « irrigation » décrit l'itinéraire technique à partir de la ou des combinaisons de logiques d'irrigation (Tableau 39), elles même décrites par la table « irrigation_description » (Tableau 38).

Nom du champ	Format	Description
id_combi_irrigation	Entier long	Identifiant élémentaire la gestion de l'irrigation
est_irrigue	Oui/Non	Oui si la culture est irriguée, non sinon
qte_totale	Entier long	Quantité d'eau apportée par irrigation (en mm)

Tableau 38 : ARSEINE : Structure de la table irrigation_description

Nom du champ	Format	Description
id_irrigation	Entier long	Identifiant de la gestion de l'irrigation
id_combi_irrigation	Entier long	Identifiant élémentaire la gestion de l'irrigation
sau_concerne	Entier long	% de surface concerné par l'identifiant élémentaire

Tableau 39 : ARSEINE : Structure de la table irrigation

Contrairement aux autres postes de l'itinéraire technique, la table « irrigation_definition » n'existe pas.

- Les produits phytosanitaires

Cette partie de la base de données a été développée mais n'a pas été utilisée exceptée dans le cadre des modélisations sur le bassin de la Vesle : elle est opérationnelle pour des utilisations ultérieures. Un itinéraire technique phytosanitaire peut être composé de différentes alternatives de combinaisons de pratiques. Ces alternatives et leurs fréquences respectives sont définies dans la table « phyto » (Tableau 40). Chaque alternative est elle-même décrite par une combinaison de traitements quantifiés et ordonnés dans le temps. Ces combinaisons sont caractérisées dans la table « phyto_description » (Tableau 41). Contrairement aux autres postes de pratiques (travail du sol, fertilisation...), la définition des produits phytosanitaires est gérée par 2 tables issues de l'exploitation des bases de données E-PHY disponibles en ligne sur le site www.data.gouv.fr (Tableau 42 et Tableau 43).

Nom du champ	Format	Description
id_phyto	Entier long	Identifiant de la gestion des produits phytosanitaires
id_combi_phyto	Entier long	Identifiant élémentaire de la gestion des produits phytosanitaires
sau_concerne	Entier long	% de surface concerné par l'identifiant élémentaire

Tableau 40 : ARSEINE : Structure de la table phyto

²⁸ Se référer à la plate-forme du gouvernement pour plus d'information.

Nom du champ	Format	Description
id_combi_phyto	Entier long	Identifiant élémentaire de la gestion des produits phytosanitaires
num_passage	Entier long	Numéro de passage
num_ordre	Entier long	Numéro d'ordre
type	Texte 50	Type de traitement (aucun, herbicide...)
nom_commercial	Texte 50	Nom commercial du produit
usage	Texte 255	Usage homologué
date_min	Entier long	Date minimale (jour julien)
date_moy	Entier long	Date moyenne (jour julien)
date_max	Entier long	Date maximale (jour julien)
dose	Réel simple	Dose épandue
unite	Texte 50	Unité de la dose épandue
IFT	Réel simple	IFT correspondant
modalite_application	Texte 50	Modalité d'application (pulvérisation, incorporation)
profondeur_incorporation	Entier long	En cas d'incorporation, profondeur d'incorporation (cm)

Tableau 41 : ARSEINE : Structure de la table phyto_description

Nom du champ	Format	Description
no_AMM	Texte 50	Numéro d'autorisation de mise sur le marché
date_premiere_autorisation	Texte 50	Date de première autorisation
date_echeance_autorisation	Texte 50	Date d'échéance d'autorisation
date_retrait_definitif	Texte 50	Date éventuelle de retrait définitif
Statut	Texte 50	Statut du produit (autorisé / retiré)
nom_commercial	Texte 255	Nom commercial du produit
type_commercial	Texte 255	Type commercial (produit de référence, produit générique, second nom commercial...)
entreprise_detentriche	Texte 255	Entreprise détentrice du produit
date_comite	Texte 50	Date du comité décisionnel
usage	Mémo	Usage homologué
dose	Texte 50	Dose homologuée
unite	Texte 50	Unité de la dose homologuée
nb_apports_max	Texte 50	Nombre d'apports maximum
DAR	Texte 50	Délai avant récolte (nombre de jours)
IZNT	Texte 50	Indicateurs de zone de non traitement (en m)
commentaire_restriction	Mémo	Commentaire sur les conditions de restriction
commentaire_condition	Mémo	Commentaire sur les conditions d'usage
type_decision	Texte 255	Type de décision (AMM provisoire, AMM, homologation...)
date_expiration_usage	Texte 50	Date d'expiration de l'usage homologué
delais_commercialisation_usage	Texte 50	Délai de commercialisation
delais_utilisation_usage	Texte 50	Délai d'utilisation
type	Texte 50	Type de produit (herbicide, fongicide...)

Tableau 42 : ARSEINE : Structure de la table phyto_definition_usages

Nom du champ	Format	Description
no_AMM	Texte 50	Numéro d'autorisation de mise sur le marché
nom_commercial	Texte 255	Nom commercial du produit
phases	Texte 100	Phases du produit
teneur	Texte 50	Teneur de la molécule active
unité	Texte 50	Unité de la teneur
substance	Texte 255	Nom de la substance active
no_CAS_substance	Texte 50	Identifiant CAS de la substance active

Tableau 43 : ARSEINE : Structure de la table phyto_definition_molecules

- La gestion spécifique des prairies

Les prairies ayant un mode de conduite bien spécifique par rapport aux cultures annuelles, en particulier par rapport à leur mode d'exploitation (fauche, pâture). On considère donc une structure de table spécifique pour ce type de conduite. De même que les paragraphes précédents, les pratiques spécifiques aux prairies sont décrites dans 3 tables. La table « prairie_definition » définit les différents modes d'exploitation possibles (Tableau 44), la table « prairie_description » définit les modalités d'une combinaison de pratiques de gestion (Tableau 45) et la table « prairie » décrit l'itinéraire technique à partir de l'ensemble de combinaisons telles que définies dans la table « prairie_description » (Tableau 46).

Nom du champ	Format	Description
type_prairie	Texte 50	Nature (simplifiée) du type de valorisation de la prairie
nom	Texte 50	Nom complet du mode de gestion de la prairie

Tableau 44 : ARSEINE : Structure de la table prairie_definition

Nom du champ	Format	Description
id_combi_prairie	Entier long	Identifiant élémentaire la gestion des prairies
num_ordre	Entier long	Numéro d'ordre du type de valorisation de la prairie
type_prairie	Texte 50	Nature (simplifiée) du type de valorisation de la prairie
date	Entier long	Date du type de valorisation de la prairie (en jour julien)
rendement_fauche	Réel simple	Rendement pour une valorisation fourragère (en tMS.ha ⁻¹)
chargement_UGB_pature	Réel simple	Chargement instantané au pâturage (UGB)
duree_pature	Entier long	Durée du pâturage (en j)
ration_sup_pature	Entier long	Part de la ration non issue de la pâture directe (en % de la ration totale)

Tableau 45 : ARSEINE : Structure de la table prairie_description

Nom du champ	Format	Description
id_prairie	Entier long	Identifiant du mode de gestion spécifique aux prairies
id_combi_prairie	Entier long	Identifiant élémentaire la gestion des prairies
sau_concerne	Entier long	% de surface concerné par l'identifiant élémentaire

Tableau 46 : ARSEINE : Structure de la table prairie

La gestion spécifique à la vigne

De même que pour la gestion des prairies, on souhaite renseigner des itinéraires techniques spécifiques aux travaux de conduite de la vigne (taille, ébourgeonnage, épamprage...). La table « vigne_definition » recense la nature des différentes opérations sur la vigne (Tableau 47), la table « vigne_description » décrit les combinaisons de modalités techniques de conduite de vigne (Tableau 48) et la table « vigne » définit un itinéraire technique à partir de ses différentes combinaisons (Tableau 49)

Nom du champ	Format	Description
type_travail	Texte 50	Nature (simplifiée) du type de travail de la vigne
nom	Texte 50	Nom complet du type de travail de la vigne
description	Mémo	Description plus détaillée des modalités techniques

Tableau 47 : ARSEINE : Structure de la table vigne_definition

Nom du champ	Format	Description
id_combi_vigne	Entier long	Identifiant élémentaire la gestion des vignes
num_ordre	Entier long	Numéro d'ordre du type travail de la vigne
type_travail	Texte 50	Nature (simplifiée) du type de travail de la vigne
date	Entier long	Date du type de travail de la vigne (en jour julien)
remarques	Mémo	Si besoin d'une remarque complémentaire

Tableau 48 : ARSEINE : Structure de la table vigne_description

Nom du champ	Format	Description
id_vigne	Entier long	Identifiant du mode de gestion spécifique à la vigne
id_combi_vigne	Entier long	Identifiant élémentaire la gestion des vignes
sau_concerne	Entier long	% de surface concerné par l'identifiant élémentaire
pct_enherbement	Entier long	Taux d'enherbement de la vigne (en %)

Tableau 49 : ARSEINE : Structure de la table vigne

Origine et fréquence des itinéraires techniques

Cette procédure a été mise en place suite aux enquêtes. Dans l'étape de synthèse des ITK types, un certain nombre d'informations sont perdues car non référencées dans les tables. Il a été décidé de conserver l'intégralité des informations brutes dans une table :

- Affiliation entre les personnes rencontrées et les itinéraires techniques qu'ils ont proposés,
- Estimation de la fréquence d'observation de ces pratiques (= fréquence d'occurrence) en classes : anecdotique, rare, possible, commun, dominant.

Les informations sont regroupées dans la table `frequence_itk`.

Nom du champ	Format	Description
id_expert	Entier	Identifiant de l'acteur
id_UMA	Texte 50	Numéro de l'UMA (-1 si toutes les UMA de l'acteur)
id_itk	Entier long	Numéro de l'ITK
frequence	Texte 50	Fréquence de l'ITK (anecdotique, rare, possible, commun, dominant)
precisions	Mémo	Toute précision mise à disposition
culture	Texte 50	Nature de la culture concernée (nom simplifié)
date_debut	Entier long	Date de début de validité de l'ITK
date_fin	Entier long	Date de fin de validité de l'ITK

Tableau 50 : ARSEINE : Structure de la table *frequence_itk*

Saisie des données de la base de données

Définition des mailles spatiales

Aucune interface n'a été mise en place pour décrire la définition des mailles spatiales. La définition se fait directement via les tables « maille_definition » et « maille_description ».

Référencement des acteurs enquêtés

Le formulaire formulaire_expert permet la saisie du contenu de la table « experts ».

Description des activités d'élevage

Aucune interface n'a été mise en place pour décrire les activités d'élevage. La saisie se fait directement dans la table « elevage_description ».

Définition des liens entre successions et types de sols

Le contenu de la table « sol_definition » se fait directement dans la table.

Le contenu de la table « sol_description » peut se faire via le formulaire saisie sol distribution. L'interface est très basique mais opérationnelle dans la version 3.5 d'ARSEINE.

Définition des successions de cultures

- La définition des successions

La définition des successions (correspondant au contenu de la table « succession_definition ») de cultures se fait via le formulaire succession_definition. Ce formulaire permet le lien avec d'autres formulaires.

- La caractérisation des successions de transition

La caractérisation des successions de transition (table « succession_transition » se fait via le formulaire parametrage_succession_transition). Ce formulaire est accessible à partir de succession_definition (accès pré-filtré).

Description des cultures et de leurs successions

La caractérisation des cultures, de leurs successions et de leurs modes de conduite se fait à partir du formulaire succession_description. Ce formulaire permet de saisir la table « succession_description » sur son volet gauche et la table « culture_description » sur son volet central. Le volet droit recense quelques éléments (lecture seule) sur les ITK de la culture. Il est accessible à partir de succession_definition (accès pré-filtré).

Les itinéraires techniques

- Le travail du sol

La caractérisation du travail du sol est accessible à partir du formulaire Saisie combinaisons du travail du sol. Il permet la saisie du contenu des tables « travail_sol » et « travail_sol_description ». Il est accessible à partir de succession_description (accès pré-filtré). Le contenu de la table « travail_sol_definition » doit être saisi directement dans la table.

- La fertilisation

La caractérisation des opérations de fertilisation est accessible à partir du formulaire « Saisie combinaisons ferti ». Il permet la saisie du contenu des tables « ferti » et « ferti_description ». Il est accessible à partir de succession_description (accès pré-filtré). Le contenu de la table « ferti_definition » doit être saisi directement dans la table.

Le formulaire est composé de deux sous-parties. La partie supérieure permet de saisir les opérations de fertilisation minérale. La partie inférieure permet la saisie des opérations de fertilisation organique. Si les deux parties sont bien distinctes pour bien séparer les deux types de fertilisation, elles renseignent toutes deux la table « ferti_description ».

- L'interculture

La caractérisation de l'interculture est accessible à partir du formulaire saisie combinaisons interculture. Il permet la saisie du contenu des tables « interculture » et « interculture_description ». Il est accessible à partir de succession_description (accès pré-filtré). Le contenu de la table « interculture_definition » doit être saisi directement dans la table.

- L'irrigation

La caractérisation de l'irrigation est accessible à partir du formulaire saisie combinaisons irrigation. Il permet la saisie du contenu des tables « irrigation » et « irrigation_description ». Il est accessible à partir de succession_description (accès pré-filtré).

- La gestion spécifique des prairies

La caractérisation de la gestion des prairies est accessible à partir du formulaire saisie combinaisons prairie. Il permet la saisie du contenu des tables « prairie » et « prairie_description ». Il est accessible à partir de succession_description (accès pré-filtré). Le contenu de la table « prairie_definition » doit être saisi directement dans la table.

- La gestion spécifique à la vigne

La caractérisation des travaux spécifiques à la vigne est accessible à partir du formulaire saisie combinaisons vigne. Il permet la saisie du contenu des tables « vigne » et « vigne_description ». Il est accessible à partir de succession_description (accès pré-filtré). Le contenu de la table « vigne_definition » doit être saisi directement dans la table.

Origine et fréquence des itinéraires techniques

Le contenu de la table « frequence_ITK » peut être saisi à partir du formulaire frequence_ITK.

Extraction des données de la base de données

Exportation des données pour la simulation

Le format des données pour la modélisation STICS MODCOU doit suivre un format bien spécifique. Une procédure d'exportation (liée à une interface) permet de mettre en forme les données de la base de données. A travers cette interface, l'utilisateur peut calibrer l'exportation. Cette calibration peut passer par la sélection d'UMA ou de périodes spécifiques. Pour ceci, la table « selection_exportation » se pré-rempli à partir de l'interface.

Nom du champ	Format	Description
UMA	Texte 50	Numéro de l'UMA
Periode	Texte 50	Période d'exportation

Tableau 51 : ARSEINE : Structure de la table selection_exportation

Par ailleurs, des tables temporaires sont créées afin d'affecter à chaque couple (succession ; année) une fréquence. Cette fréquence est calculée à partir (i) de la fréquence définie dans la table « succession_definition » et (ii) des éventuelles transitions caractérisées dans la table « succession_transition » (cette dernière table n'étant qu'une table de calibration des fréquences). A l'issue de la procédure de calcul, la table « succession_transition_temp » est créée.

Nom du champ	Format	Description
ANNEE	Entier long	Année
ID_SUCCESSION	Entier long	N° de la succession
SURFACE	Réel double	Fréquence de la succession en % de SAU

Tableau 52 : ARSEINE : Structure de la table succession_transition_temp

De même, si la table « sol_description » a été renseignée, il est nécessaire de calculer les fréquences triplets (succession ; n° de sol ; année). Une procédure réalise les calculs à partir (i) de la table « succession_transition_temp » et de la table « sol_description » dont le contenu ne fait que quantifier une différence de fréquence et non une fréquence à part entière. La procédure crée la table « succession_transition_temp_UCS ».

Nom du champ	Format	Description
UCS	Texte 50	N° de l'UCS
ID_SUCCESSION	Entier long	N° de la succession
ANNEE	Entier long	Année
SURFACE	Réel double	Fréquence de la succession en % de SAU

Tableau 53 : ARSEINE : Structure de la table succession_transition_temp_UCS

Le contenu de ces tables est ensuite transféré pour compléter le fichier Excel d'exportation.

Comment réaliser une extraction d'indicateurs ?

Dans cette partie, nous présentons la démarche à suivre pour réaliser une extraction d'indicateurs d'ARSEINE en vue d'une représentation cartographique explicite.

ARSEINE base la description des pratiques agricoles sur la base des systèmes de culture, contenant une ou plusieurs cultures (chacune étant caractérisée par un itinéraire technique) et dont la fréquence évolue dans le temps. Ce chapitre présente quelques points de vigilance à avoir en tête lors de l'interrogation de la base de données. L'exemple détaillé est le suivant : Quelle a été l'évolution de la fertilisation azotée minérale sur le blé tendre sur le plateau des Barrois (UMA 11) de 1970 à 2014 ?

- Calcul de la dose totale d'azote minéral par occurrence de blé dans les successions

La base de données contient 49 successions de 1970 à 2014 définies sur l'UMA 11. Compte tenu que la description de la fertilisation est détaillée par apport (entre 2 et 3 apports en général sur blé), il convient en premier de calculer la dose totale d'azote minéral apporté pour chaque occurrence de blé tendre dans les successions de l'UMA 11.

7 tables sont nécessaires à cette première opération, dont le résultat sera repris par la suite.

- La table succession_definition apporte les informations sur la localisation des successions (UMA 11)
- La table succession_transition_temp apporte l'information sur l'évolution de la fréquence des successions dans le temps. Attention, il ne faut pas utiliser la variable succession_definition.surface qui correspond à la fréquence de chaque succession la première année de la période homogène. La valeur de cette variable est invariante dans le temps !
- La table succession_description fait le lien entre la localisation des successions, les cultures associées et leurs itinéraires techniques.
- La table culture_description apporte les informations sur la nature de la culture (ici pour ne sélectionner que le blé tendre).
- La table ferti qui référence tous les itinéraires techniques de fertilisation (ensemble de combinaisons d'opérations de fertilisation).
- La table ferti_description décrit chaque opération de fertilisation.
- La table ferti_definition permet de faire la distinction entre les fertilisants organiques et minéraux.

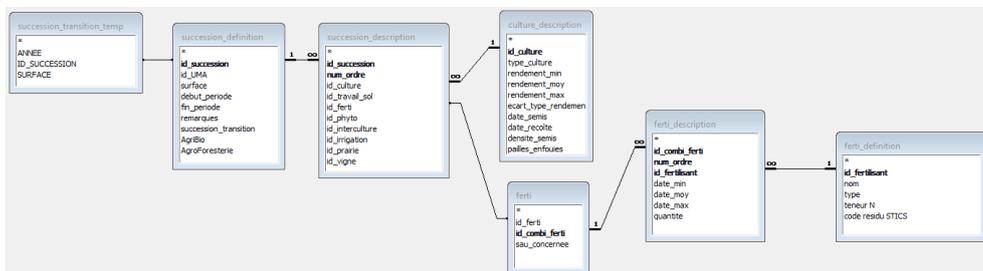


Figure 29 : Capture d'écran des tables à utiliser pour une requête sur la fertilisation (source ARSEINE)

Le contenu SQL de la requête est alors :

```

« SELECT succession_definition.id_UMA, culture_description.type_culture, succession_transition_temp.ANNEE,
succession_definition.id_succession, succession_description.num_ordre, ferti_definition.type, ferti_descrip-
tion.quantite, succession_transition_temp.SURFACE, succession_transition_temp.SURFACE/nombre_cultures(succes-
sion_description.id_succession) AS surface_elementaire, ferti_description.id_fertilisant, ferti_descrip-
tion.date_moy
  
```

```
FROM (succession_definition INNER JOIN succession_transition_temp ON succession_definition.id_succession =
succession_transition_temp.ID_SUCCESION) INNER JOIN ((culture_description INNER JOIN (ferti INNER JOIN suc-
cession_description ON ferti.id_ferti = succession_description.id_ferti) ON culture_description.id_culture =
succession_description.id_culture) INNER JOIN (ferti_definition INNER JOIN ferti_description ON ferti_defini-
tion.id_fertilisant = ferti_description.id_fertilisant) ON ferti.id_combi_ferti = ferti_descrip-
tion.id_combi_ferti) ON succession_definition.id_succession = succession_description.id_succession
WHERE (((succession_definition.id_UMA="11") AND ((culture_description.type_culture)="Bt") AND ((ferti_defi-
nition.type)="minéral") AND ((ferti_description.id_fertilisant)<>"ammo sur paille") AND ((ferti.sau_concer-
nee)=max_sau_ferti([ferti].[id_ferti]))) ORDER BY succession_definition.id_UMA, culture_description.type_cul-
ture, succession_transition_temp.ANNEE, succession_definition.id_succession; »
```

Cette requête fait une sélection des enregistrements d'intérêt : les blés tendre (culture_description.type_cul-
 ture="Bt") des barrois (succession_definition.id_UMA="11") dont la fertilisation est de type minéral (ferti_de-
 finition.type="minéral"). On souhaite exclure les apports de fertilisants réalisés sur les pailles du précédent
 culturel (pratiques spécifiques des années 1970-80) (ferti_description.id_fertilisant<>"ammo sur paille").
 Note qu'il faut toujours sélectionner la combinaison majoritaire, quelque soit l'analyse réalisée.

A titre d'exemple, le tableau ci-dessous présente l'exemple d'un itinéraire technique A composé de 2
 combinaisons. La combinaison 1, représentant 75% de l'ITK est réalisée en 3 apports, la combinaison 2,
 réalisée en 2 apports ne représente que 25% de l'ITK. Sélectionner la combinaison majoritaire permet de
 considérer que la fertilisation de l'ITK A est réalisée en 3 apports.

N° ITK	N° de combinaison	Fréquence de la combinaison	Apport 1	Apport 2	Apport 3
A	1	75	50	80	40
A	2	25	50	120	

A noter également qu'il convient de calculer la surface que représente la culture à partir d'une part de la
 fréquence de la succession et d'autre part de la fréquence de la culture dans la succession. Par exemple,
 dans une succession colza-blé-orge représentant 30% de la surface d'une UMA, le blé ne représente qu'un
 tiers de la succession. Par conséquent, la fréquence élémentaire du blé est de 10%.

Après avoir sélectionné les données correspondantes au besoin de la requête (ci-dessus), il faut calculer la
 dose totale d'azote minéral sur chaque terme de la succession puis le pondérer par la fréquence de la culture

sur l'UMA : « SELECT requeteIni.id_UMA, requeteIni.type_culture, requeteIni.ANNEE, requeteIni.id_succession,
 requeteIni.num_ordre, requeteIni.TotNMin, requeteIni.Surface_elementaire, [TotNMin]*[Surface_elementaire] AS
 TotNMinPondere
 FROM (SELECT Ferti_minerale_evolution_1.id_UMA, Ferti_minerale_evolution_1.type_culture, Ferti_minerale_evo-
 lution_1.ANNEE, Ferti_minerale_evolution_1.id_succession, Ferti_minerale_evolution_1.num_ordre, Sum(Ferti_mi-
 nerale_evolution_1.quantite) AS TotNMin, Avg(Ferti_minerale_evolution_1.surface_elementaire) AS Surface_ele-
 mentaire
 FROM Ferti_minerale_evolution_1
 GROUP BY Ferti_minerale_evolution_1.id_UMA, Ferti_minerale_evolution_1.type_culture, Ferti_minerale_evolu-
 tion_1.ANNEE, Ferti_minerale_evolution_1.id_succession, Ferti_minerale_evolution_1.num_ordre
 ORDER BY Ferti_minerale_evolution_1.id_UMA, Ferti_minerale_evolution_1.type_culture, Ferti_minerale_evolu-
 tion_1.ANNEE, Ferti_minerale_evolution_1.id_succession) AS requeteIni; »

L'étape suivante consiste à sommer les doses d'azote (pondérées par la surface de la culture) de chaque
 culture par UMA/Année/culture puis de ramener la somme à la SAU de la culture l'année considérée (défini
 par la requête *assolement_transition*) :

```
« SELECT requeteInitiale.id_UMA, requeteInitiale.type_culture, requeteInitiale.ANNEE, [SommeDeTotNMinPon-  

dere]/[assolement_pctSAU] AS FertiMoy, assolement_transition.assolement_pctSAU
```

```
FROM assolement_transition INNER JOIN (SELECT Ferti_minerale_evolution_2.id_UMA, Ferti_minerale_evolution_2.type_culture, Ferti_minerale_evolution_2.ANNEE, Sum(Ferti_minerale_evolution_2.TotNMinPondere) AS SommeDeTotNMinPondere
FROM Ferti_minerale_evolution_2
GROUP BY Ferti_minerale_evolution_2.id_UMA, Ferti_minerale_evolution_2.type_culture, Ferti_minerale_evolution_2.ANNEE) AS requeteInitiale ON (requeteInitiale.ANNEE = assolement_transition.ANNEE) AND (requeteInitiale.type_culture = assolement_transition.type_culture) AND (assolement_transition.id_UMA = requeteInitiale.id_UMA); >>
```

Le résultat permet alors d'avoir accès à l'évolution souhaitée, présenté sur la Figure 30 :

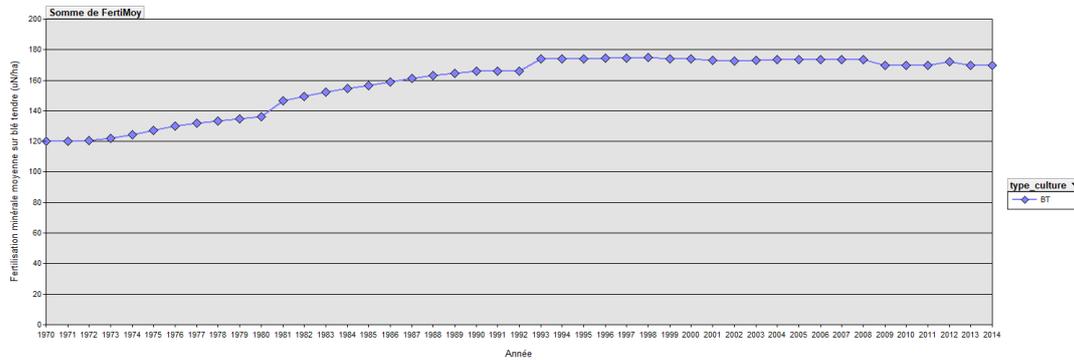


Figure 30 : résultat graphique de l'évolution de la fertilisation azotée minérale sur le blé tendre dans l'UMA 11 (source AR-SEINE).

A partir de ce type de résultats, il est possible de calculer des indicateurs moyennés à l'échelle des Grandes Régions Agricoles ou du bassin dans son ensemble dans la mesure où les données sont moyennées compte tenu de la part de SAU de chaque UMA dans l'espace analysé.

Mise à jour simplifiée de la base de données (via les assolements)

Comment estimer l'évolution des assolements d'une UMA ?

L'estimation de l'évolution des assolements est gérée dans un fichier Excel® (*tableaux_par_UMA.xlsm*). Les cinq premiers onglets contiennent l'assolement (toujours exprimés en pourcentage de SAU) de chaque UMA. Ces valeurs sont invariants dans le temps car issues de l'analyse des recensements agricoles (1970 à 2010). L'onglet général contient 3 tableaux : le tableau de droite contient la liste des cultures, le tableau central contient l'affectation d'une UMA à un (et un seul) département (ce tableau permet d'estimer l'assolement de l'UMA au regard de l'évolution de l'assolement de son département de référence). Le dernier tableau contient les valeurs d'assolement issus des statistiques agricoles annuelles. C'est ce tableau qu'il convient d'implémenter à chaque nouvelle série de données publiée dans les SAA²⁹.

Les 95 autres onglets représentent les données individualisées par UMA (nom de l'onglet = n° de l'UMA). Le contenu de ces tableaux est généré automatiquement (voir par la suite).

Dès qu'une nouvelle (et/ou plusieurs) année a été rajoutée dans l'onglet « *general* », il convient de reconstituer l'assolement de l'UMA par application de la procédure théorique telle que détaillée dans le corps du rapport. Par défaut, c'est l'ensemble de la feuille est régénérée (et pas uniquement l'année supplémentaire rajoutée). Pour ce faire, il convient d'exécuter la macro *general()* du module 1. Cette macro parcourt les onglets 7 à 101 (à ajuster si besoin) correspondant aux 95 UMA. Elle efface l'ensemble des données puis les reconstitue par application de la procédure en intégrant la (/les) nouvelle année issue des statistiques agricoles annuelles. Cette macro réalise également des graphiques pour un aperçu plus visuel. Au total 4 graphiques sont représentés (céréales³⁰, têtes de rotations³¹, fourrages³² et autres cultures³³). Par exemple, la Figure 31 présente l'estimation des surfaces en céréales de l'UMA 152 (avec ajout des données 2014 à 2016 par rapport à ce présenté sur la Figure 12).

²⁹ L'organisation de ces tableaux (position dans le tableau, contenu des listes) ne doit être modifiée qu'avec grande précaution, au risque de mettre en échec la procédure d'actualisation des données.

³⁰ Blé tendre, blé dur, orge d'hiver, orge de printemps, autres céréales.

³¹ Maïs grain, betterave, colza, tournesol, pois, féverole

³² Maïs fourrage, prairies artificielles, prairies temporaires semées, surfaces toujours en herbe, autres cultures fourragères

³³ Légumes, pommes de terre, vignes, jachères, lin, vergers.

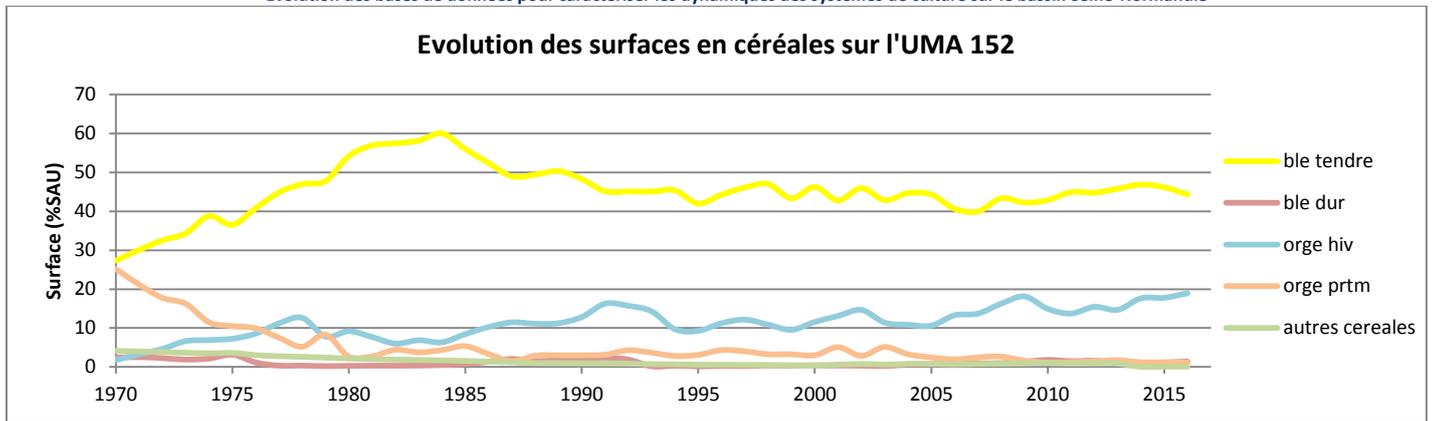


Figure 31 : Estimation des surfaces en céréales de l'UMA 152.

Comment ajouter ou modifier une période homogène dans la base de données ?

Cette opération doit se faire avec une grande précaution. Il est très vivement conseillé de travailler sur une copie de la base initiale (les fausses manipulations sous VBA sont généralement irréversibles).

- Ajouter une période homogène

Une période homogène peut être créée manuellement via le formulaire *succession_definition* en créant de nouvelles successions de cultures et en ajustant les dates de début et de fin. Cette opération est généralement déconseillée car relativement longue.

Le module *Module_ajoute_périodeHomogène* via la procédure *initialise_période_2015_2030()* permet de créer une période homogène de 2015 à 2030³⁴ dont les paramètres (successions de cultures, itinéraires techniques, fréquences) sont identiques aux paramètres de la dernière année de la période précédente.

- Modifier la durée d'une période homogène

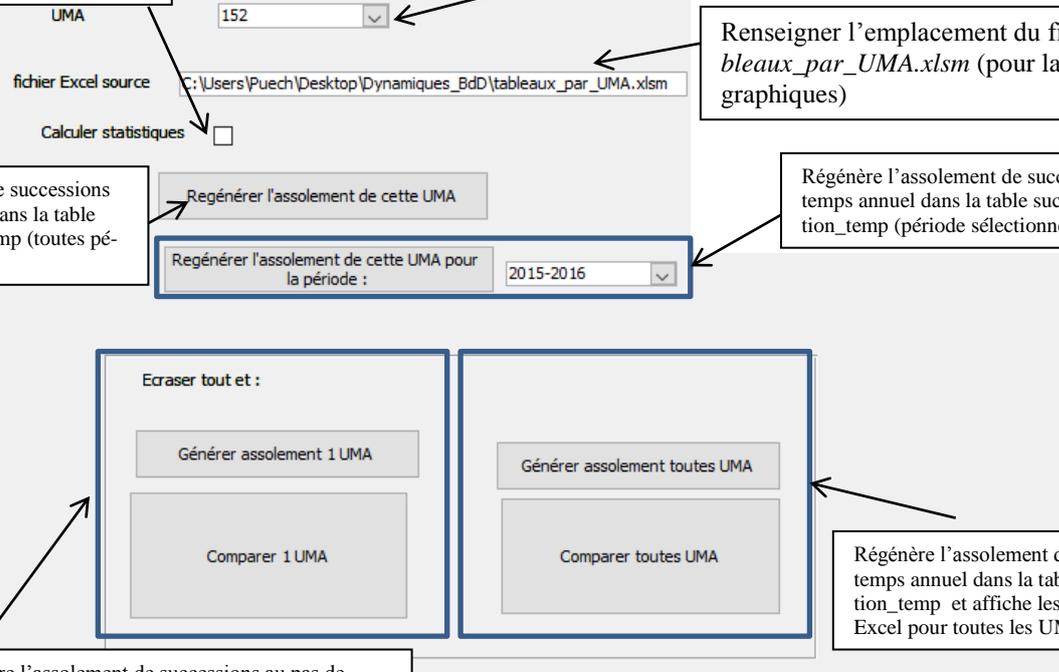
Cette opération est facile puisqu'il suffit (par requête ou via le formulaire *succession_definition*) de modifier la date de fin de période de chaque succession de cultures.

- Modifier le contenu d'une période homogène

Il s'agit dans ce paragraphe de faire évoluer l'assolement de successions de cultures (et donc l'assolement de cultures, et éventuellement d'ITK) pour le faire correspondre avec une évolution d'assolement. La fréquence des successions de cultures, si elle est définie par défaut dans la table *succession_definition* est en fait effective la table *succession_transition_temp* (cette table permet de gérer les évolutions de fréquences

³⁴ Valeur modifiable dans les fonctions appelées, non détaillé dans ce document.

de successions au sein d'une période homogène). La table *succession_transition_temp* est générable automatiquement à partir du formulaire de travail *evolution_assolements* (Figure 32).



The screenshot shows a web form for generating crop rotation data. It includes a dropdown for 'UMA' (set to 152), a text field for 'fichier Excel source' (pointing to a file on the desktop), a 'Calculer statistiques' checkbox, and buttons for 'Regénérer l'assolement de cette UMA' and 'Regénérer l'assolement de cette UMA pour la période : 2015-2016'. Below are two panels: 'Ecraser tout et : Générer assolement 1 UMA / Comparer 1 UMA' and 'Générer assolement toutes UMA / Comparer toutes UMA'.

Callouts:

- Calcul des statistiques simples (écarts moyens d'assolement) dans le fichier Excel
- Renseigner le numéro de l'UMA dont il faut générer l'assolement annuel
- Renseigner l'emplacement du fichier *tableaux_par_UMA.xlsm* (pour la réalisation des graphiques)
- Regénère l'assolement de successions au pas de temps annuel dans la table *succession_transition_temp* (toutes périodes)
- Regénère l'assolement de successions au pas de temps annuel dans la table *succession_transition_temp* (période sélectionnée uniquement)
- Regénère l'assolement de successions au pas de temps annuel dans la table *succession_transition_temp* et affiche les valeurs dans les graphiques Excel pour toutes les UMA
- Regénère l'assolement de successions au pas de temps annuel dans la table *succession_transition_temp* et affiche les valeurs dans les graphiques Excel pour l'UMA sélectionnée

Figure 32 : Formulaire de travail *evolution_assolement*.

- Visualiser les modifications

Il s'agit là d'une étape importante pour visualiser si les modifications réalisées correspondent aux évolutions d'assolement tels qu'estimés à partir des SAA.

Application : comment actualiser l'UMA 152 sur les années 2014 - 2016 ?

Tel que présenté dans la partie 2.4.1, l'assolement de la base de données (en symboles ponctuels sur la Figure 33) est manquant pour les années 2015 et 2016.

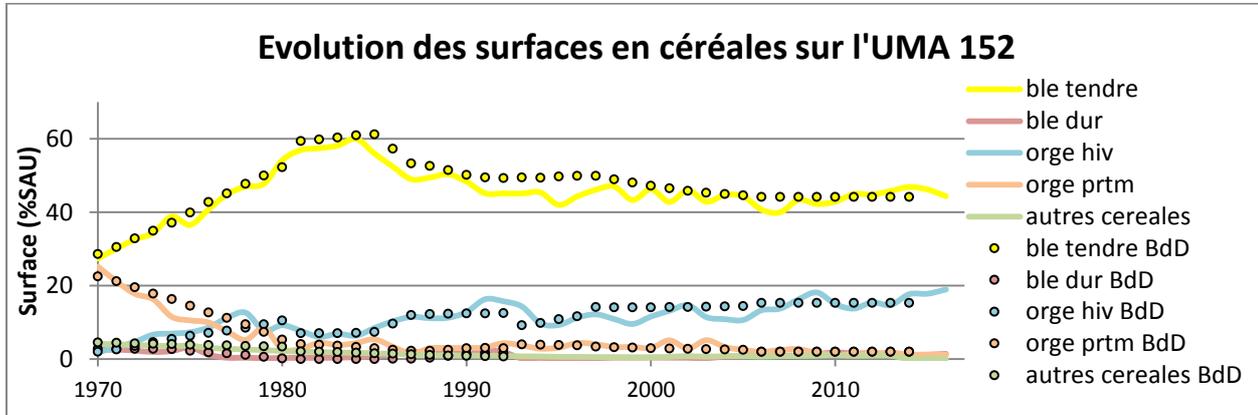


Figure 33 : Etat de l'assolement en céréales de l'UMA 152 avant actualisation de la base de données.

Il convient alors d'ajouter une période homogène correspondant à la période souhaitée (2015-2016), période homogène que nous pourrions rallonger les années suivantes (2015-2017, puis 2015-2018...).

- Ajouter une période homogène

Comme décrit précédemment, on crée à partir de la procédure VBA une nouvelle période homogène (2015-2016) dont l'ensemble des paramètres sont égaux à l'état de l'UMA en 2014.

- Visualisation des évolutions

La procédure de visualisation des données de la base de données (en figurés ponctuels sur la Figure 34, indicés *xxx_BdD* dans la légende) a été automatisée. Ainsi, l'assolement représenté par la combinaison des successions de cultures (et leur évolutions de fréquence) peut être projeté sur l'assolement estimé à partir des SAA. A noter, sur la Figure 34, l'apparition de figurés ponctuels pour les années 2015 et 2016 correspondants aux données ajoutés dans la base de données.

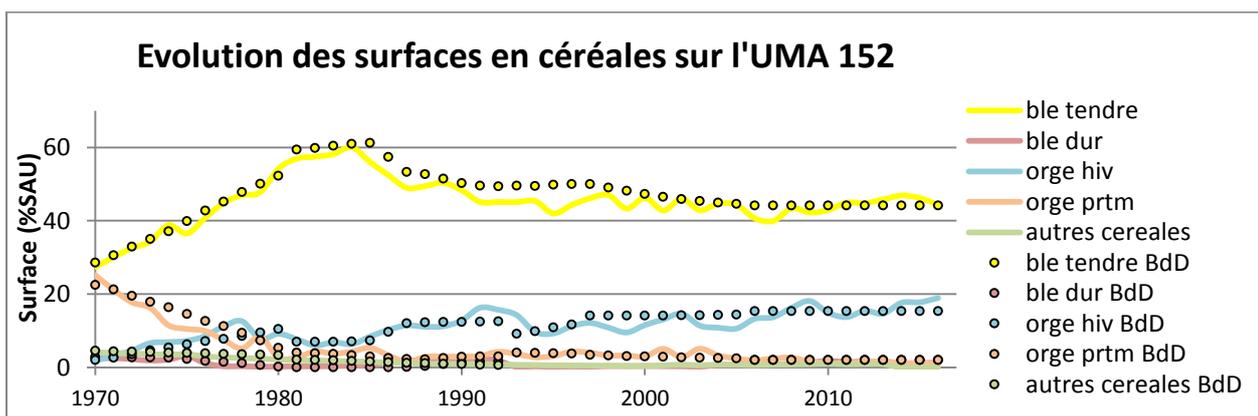


Figure 34 : Etat de l'assolement en céréales de l'UMA 152 après actualisation de la base de données.

- Modifier le contenu d'une période homogène

Si l'écart d'assolement est jugé insatisfaisant par l'utilisateur, il convient alors d'ajouter autant de successions que nécessaire jusqu'à aboutir à une différence *assolement estimé via les SAA / assolement représenté dans ARSEINE* satisfaisant.

Pour se faire, il suffit de créer autant de successions que souhaité dans le formulaire *succession_definition* (même UMA, même période homogène) puis dans le formulaire *succession_description*. Dans le formulaire *succession_definition*, cocher la case [succession de transition] puis paramétrer la transition à partir des différents modèles de transition présentés dans le paragraphe 2.3 (les successions sont alors dites « de transition »). Pour que la transition soit prise en compte, il convient de régénérer l'assolement de successions de cultures avant chaque affichage graphique dans le fichier Excel (Figure 32) sans quoi les modifications ne seront pas prises en compte. Par convention, les successions de transition ont une fréquence nulle la première année de la période homogène³⁵).

Les successions de cultures étant le support des systèmes de culture, cette procédure peut (et doit) être utilisée pour représenter des évolutions de pratiques (fertilisation, travail du sol, interculture...).

³⁵ Exception faite pour les successions « de Dirac » explicitement paramétrées comme non nulles la première année de la période homogène.

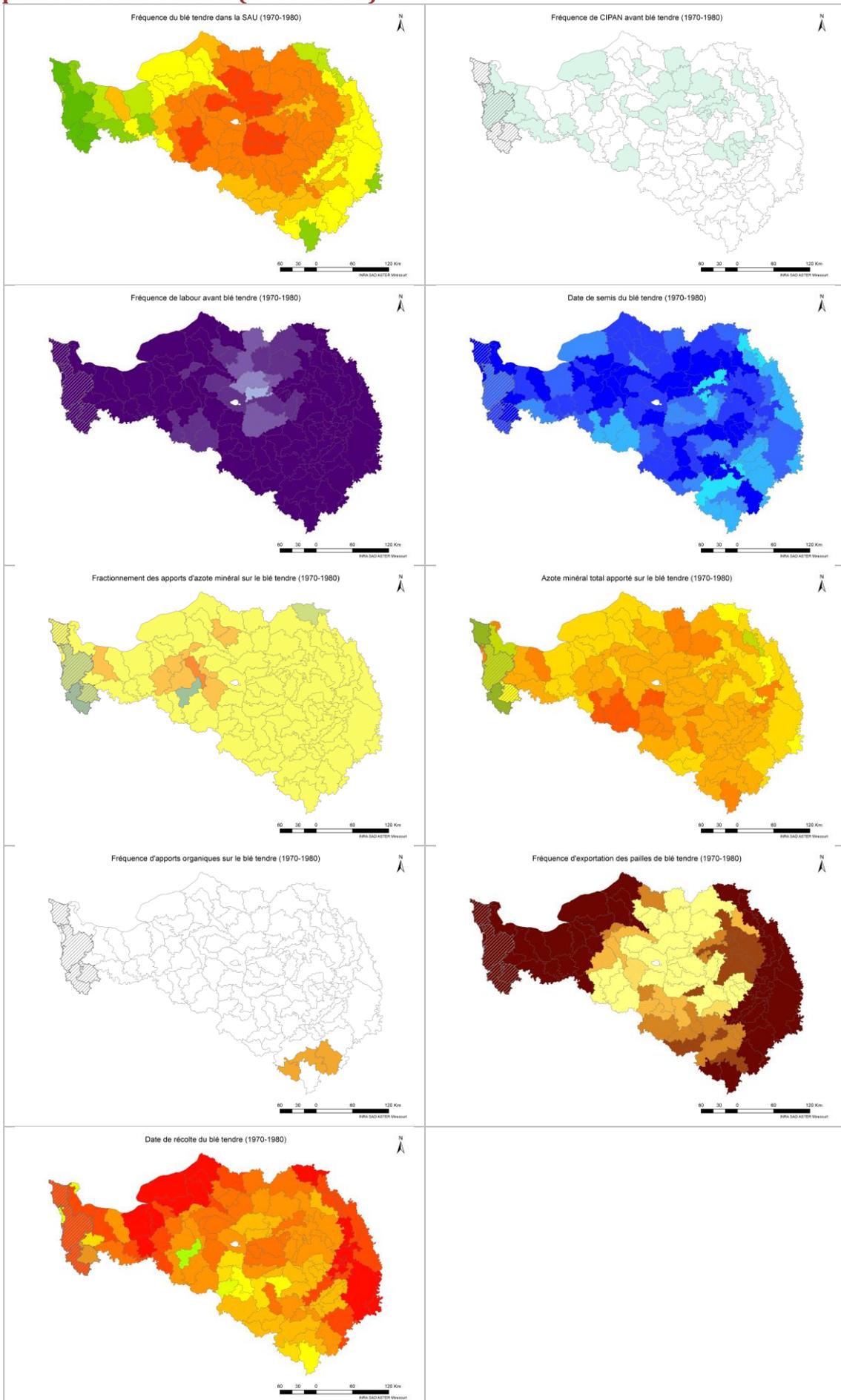
Annexe 2 : Cartographie de l'évolution des pratiques agricoles sur le bassin Seine-Normandie entre 1970 et 2013

Légendes

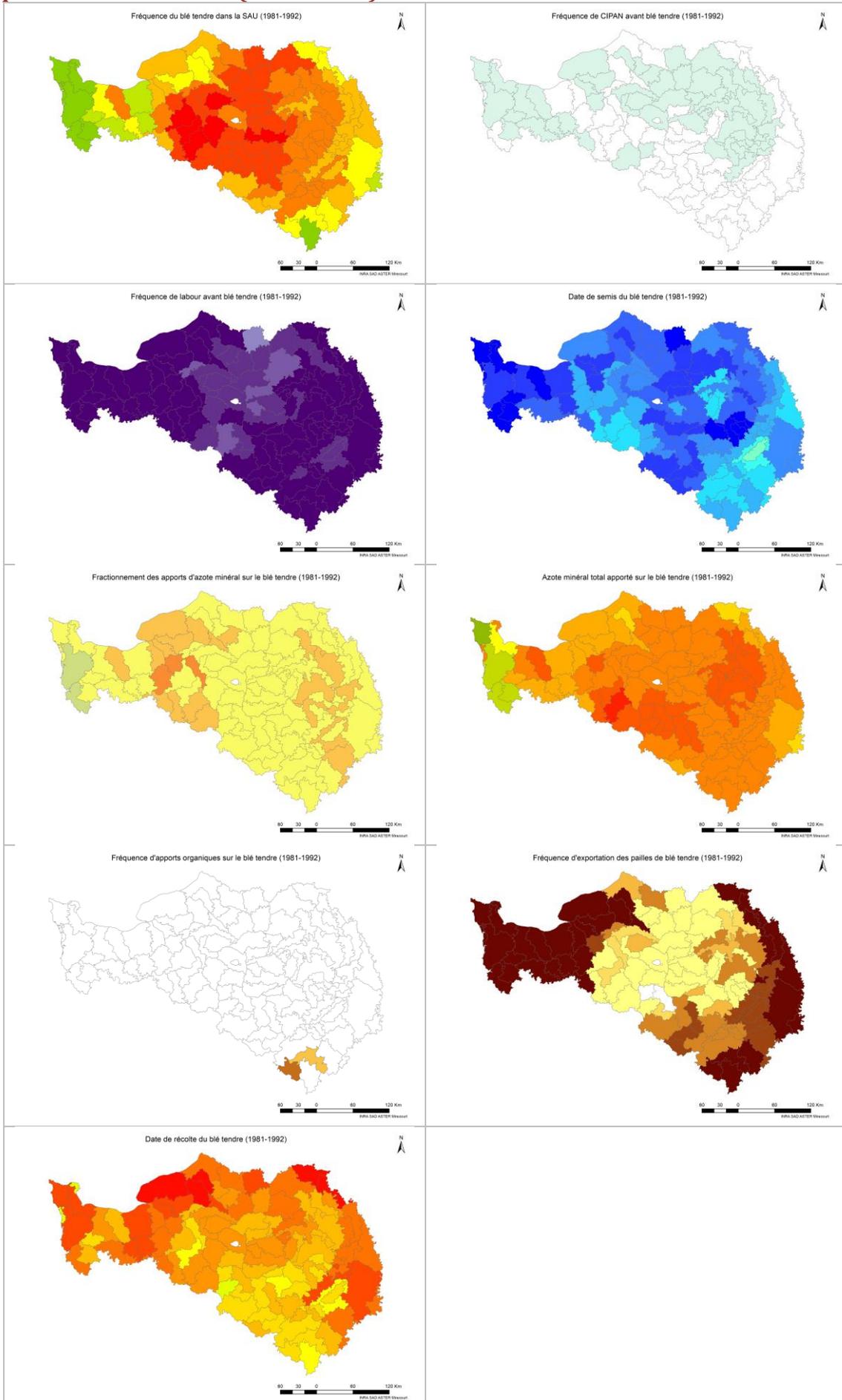
De façon à faciliter la lecture des cartes suivantes, la légende a été retirée des cartes et est présentée selon la grille suivante :

<p>Filtre d'affichage des données</p> <p> Valeur non disponible : culture non concernée par l'indicateur, culture non représentée dans la base de données...</p> <p> Valeur calculée pour une culture faiblement représentée (< 2% SAU)</p> <p> Valeur de l'indicateur</p>	<p>Fréquence de la culture dans l'assolement (en % de SAU)</p> <ul style="list-style-type: none"> < 1 % 1 - 2 % 2 - 5 % 5 - 10 % 10 - 20 % 20 - 30 % 30 - 40 % 40 - 50 % > 50 % 	<p>Fréquence de couverts intermédiaires avant l'implantation de la culture (% SAU de la culture)</p> <ul style="list-style-type: none"> < 5% de cultures intermédiaires 5 - 10 % de cultures intermédiaires 10 - 20 % de cultures intermédiaires 20 - 50 % de cultures intermédiaires 50 - 80 % de cultures intermédiaires >80 % de cultures intermédiaires <p><small>Cette fréquence correspond à des CIPAN pour les cultures de printemps et aux repousses du précédent cultural pour les cultures d'automne. Cette fréquence est calculée sur les surfaces éligibles au regard de la réglementation (Directive Nitrates).</small></p>
<p>Fréquence de labour (% de SAU de la culture)</p> <ul style="list-style-type: none"> < 5% de labour 5 - 10 % de labour 10 - 20 % de labour 20 - 50 % de labour 50 - 80 % de labour >80 % de labour 	<p>Fréquence de fumure organique (% de SAU de la culture)</p> <ul style="list-style-type: none"> Pas de fumure organique < 5 % de fumure organique 5 - 10 % de fumure organique 10 - 20 % de fumure organique 20 - 50 % de fumure organique 50 - 80 % de fumure organique > 80 % de fumure organique 	<p>Fréquence d'exportation des résidus de culture (% SAU de la culture)</p> <ul style="list-style-type: none"> < 5% de pailles exportées 5 - 10 % de pailles exportées 10 - 20 % de pailles exportées 20 - 50 % de pailles exportées 50 - 80 % de pailles exportées >80 % de pailles exportées
<p>Fertilisation azotée minérale totale</p> <ul style="list-style-type: none"> 0 uN/ha < 40 uN/ha 40-60 uN/ha 60-80 uN/ha 80-100 uN/ha 100-120 uN/ha 120-140 uN/ha 140-160 uN/ha 160-180 uN/ha 180-200 uN/ha 200 uN/ha et plus 	<p>Date moyenne de semis des cultures d'automne</p> <ul style="list-style-type: none"> Semis avant le 25/08 Semis entre le 25/08 et le 01/09 Semis entre le 01/09 et le 05/09 Semis entre le 05/09 et le 10/09 Semis entre le 10/09 et le 15/09 Semis entre le 15/09 et le 20/09 Semis entre le 20/09 et le 25/09 Semis entre le 25/09 et le 01/10 Semis entre le 01/10 et le 05/10 Semis entre le 05/10 et le 10/10 Semis entre le 10/10 et le 15/10 Semis entre le 15/10 et le 20/10 Semis entre le 20/10 et le 25/10 Semis entre le 25/10 et le 01/11 Semis entre le 01/11 et le 05/11 Semis entre le 05/11 et le 10/11 Semis après le 10/11 	<p>Date moyenne de récolte des cultures récoltées en été</p> <ul style="list-style-type: none"> Récolte avant le 20/06 Récolte entre le 20/06 et le 25/06 Récolte entre le 25/06 et le 01/07 Récolte entre le 01/07 et le 05/07 Récolte entre le 05/07 et le 10/07 Récolte entre le 10/07 et le 15/07 Récolte entre le 15/07 et le 20/07 Récolte entre le 20/07 et le 25/07 Récolte entre le 25/07 et le 01/08 Récolte entre le 01/08 et le 05/08 Récolte entre le 05/08 et le 10/08 Récolte entre le 10/08 et le 15/08 Récolte après le 15/08
<p>Fractionnement des apports d'azote minéral</p> <ul style="list-style-type: none"> 0 apports Moins de 1 apport 1 apport Entre 1 et 2 apports 2 apports Entre 2 et 3 apports 3 apports Entre 3 et 4 apports 4 apports ou plus 	<p>Date moyenne de semis des cultures de printemps</p> <ul style="list-style-type: none"> Semis avant le 10/02 Semis entre le 10/02 et le 15/02 Semis entre le 15/02 et le 20/02 Semis entre le 20/02 et le 25/02 Semis entre le 25/02 et le 01/03 Semis entre le 01/03 et le 05/03 Semis entre le 05/03 et le 10/03 Semis entre le 10/03 et le 15/03 Semis entre le 15/03 et le 20/03 Semis entre le 20/03 et le 25/03 Semis entre le 25/03 et le 01/04 Semis entre le 01/04 et le 05/04 Semis entre le 05/04 et le 10/04 Semis entre le 10/04 et le 15/04 Semis entre le 15/04 et le 20/04 Semis entre le 20/04 et le 25/04 Semis entre le 25/04 et le 01/05 Semis entre le 01/05 et le 05/05 Semis entre le 05/05 et le 10/05 Semis après le 10/05 	<p>Date moyenne de récolte des cultures récoltées à l'automne</p> <ul style="list-style-type: none"> Récolte avant le 10/09 Récolte entre le 10/09 et le 15/09 Récolte entre le 15/09 et le 20/09 Récolte entre le 20/09 et le 25/09 Récolte entre le 25/09 et le 01/10 Récolte entre le 01/10 et le 05/10 Récolte entre le 05/10 et le 10/10 Récolte entre le 10/10 et le 15/10 Récolte entre le 15/10 et le 20/10 Récolte entre le 20/10 et le 25/10 Récolte entre le 25/10 et le 01/11 Récolte entre le 01/11 et le 05/11 Récolte après le 05/11

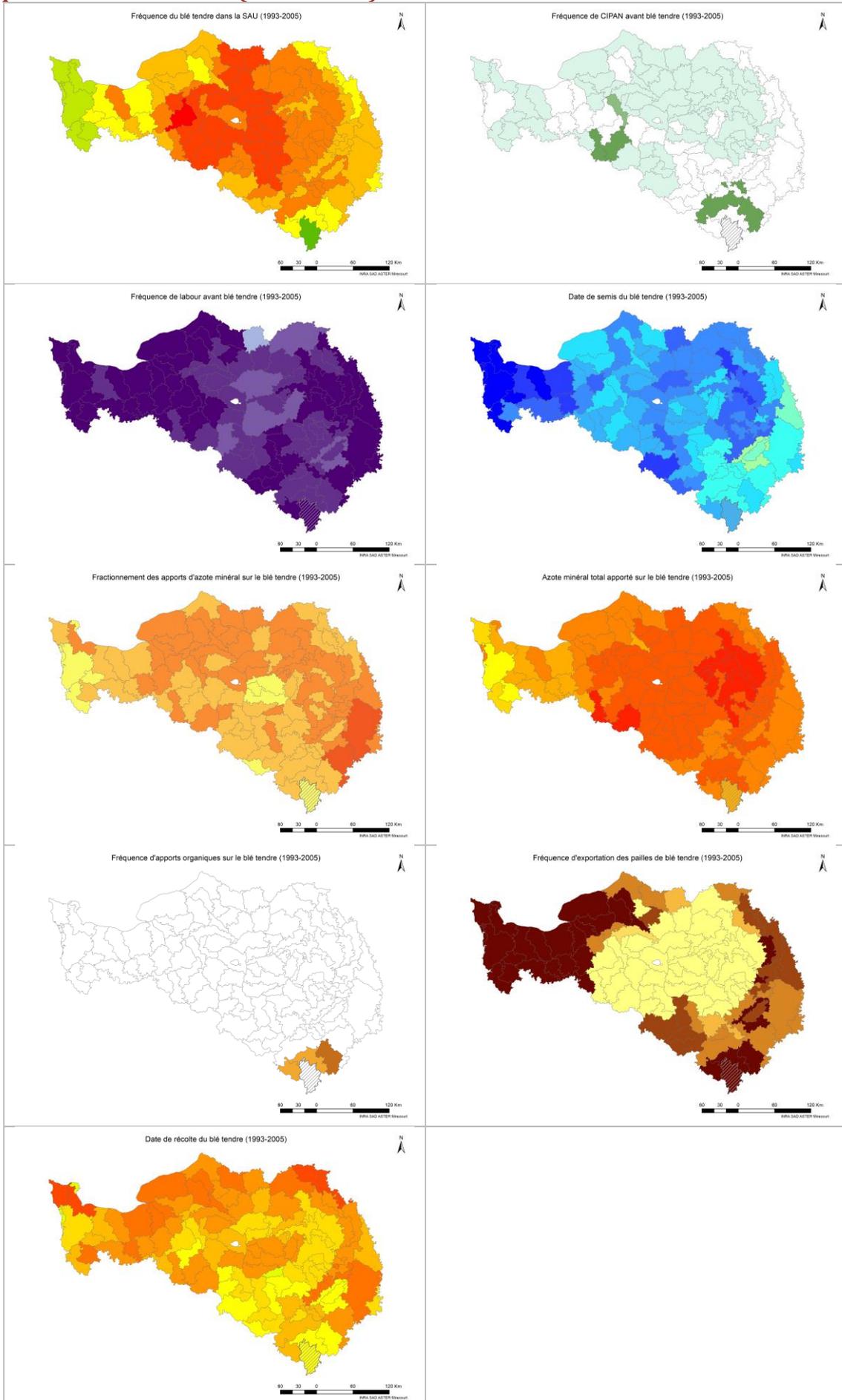
Pratiques sur le blé tendre (1970-1980)



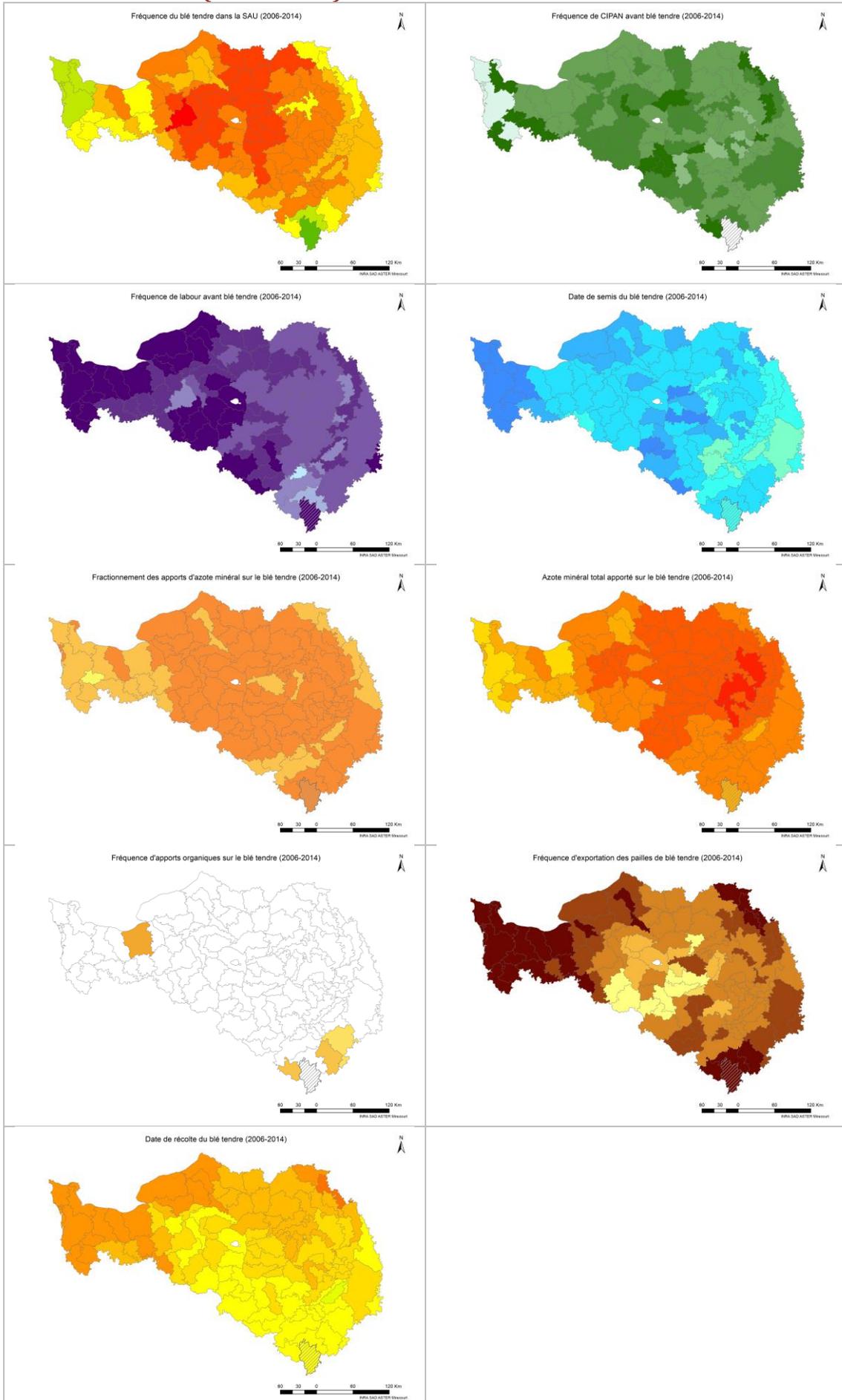
Pratiques sur le blé tendre (1981-1992)



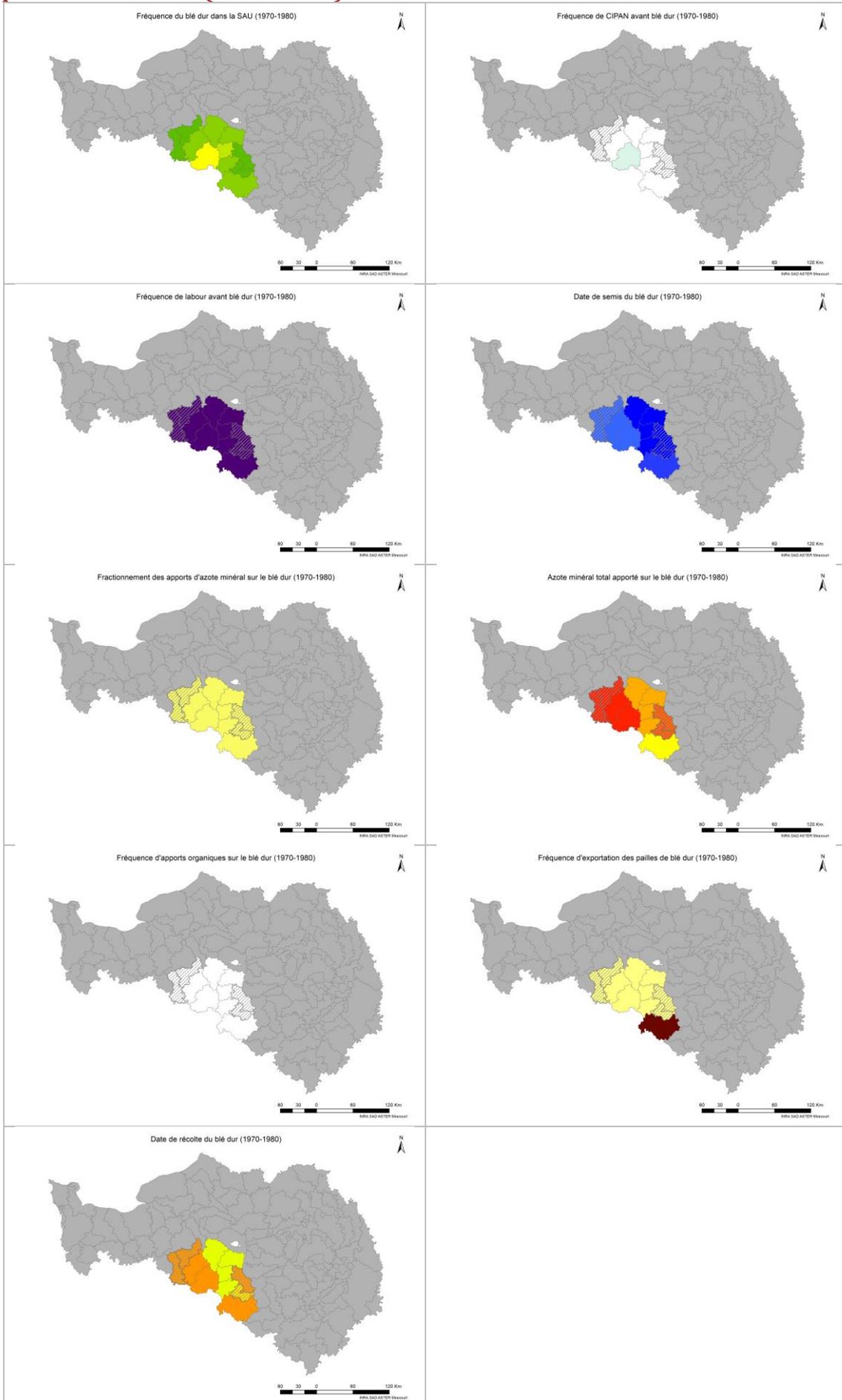
Pratiques sur le blé tendre (1993-2005)



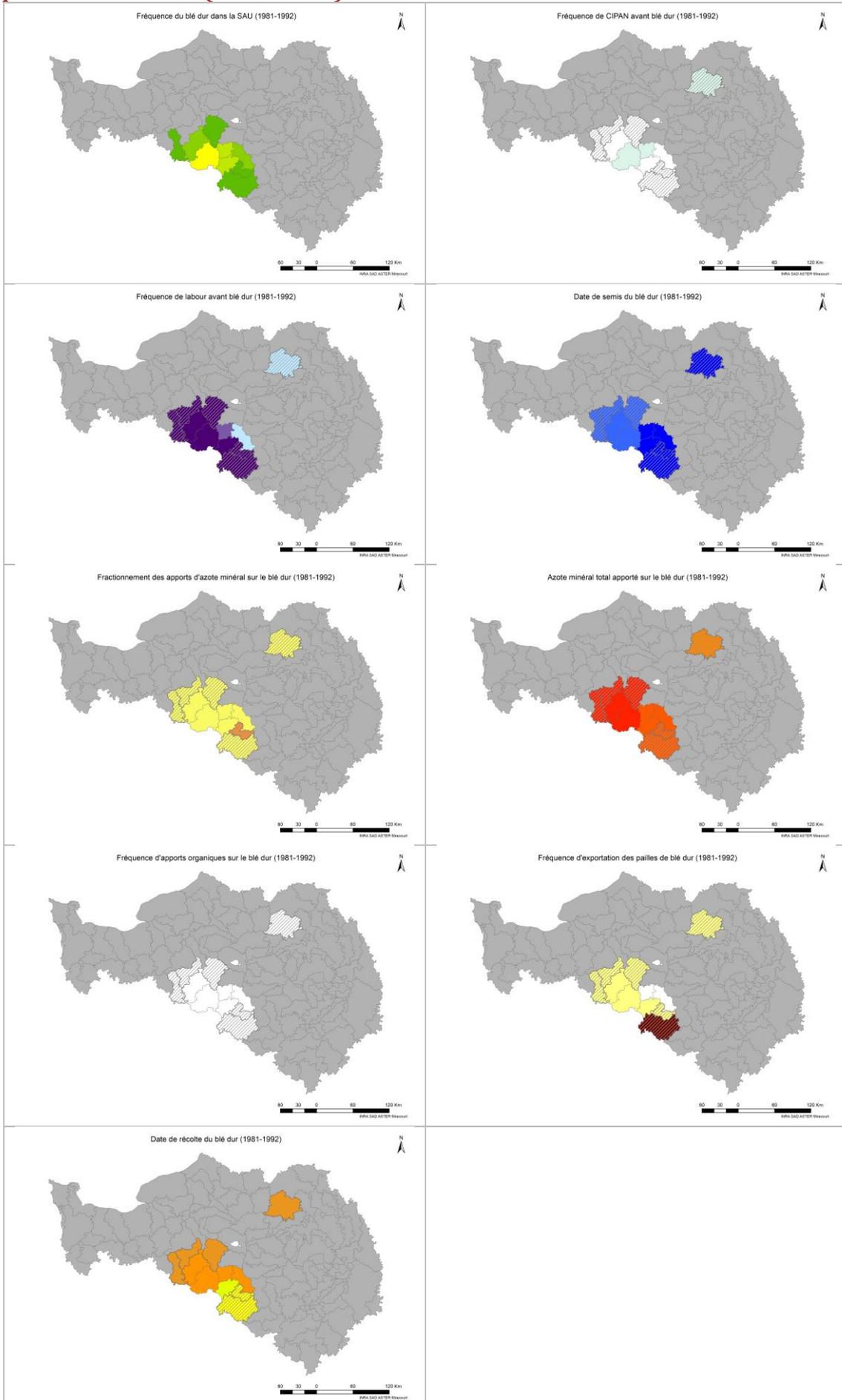
Pratiques sur le blé tendre (2006-2014)



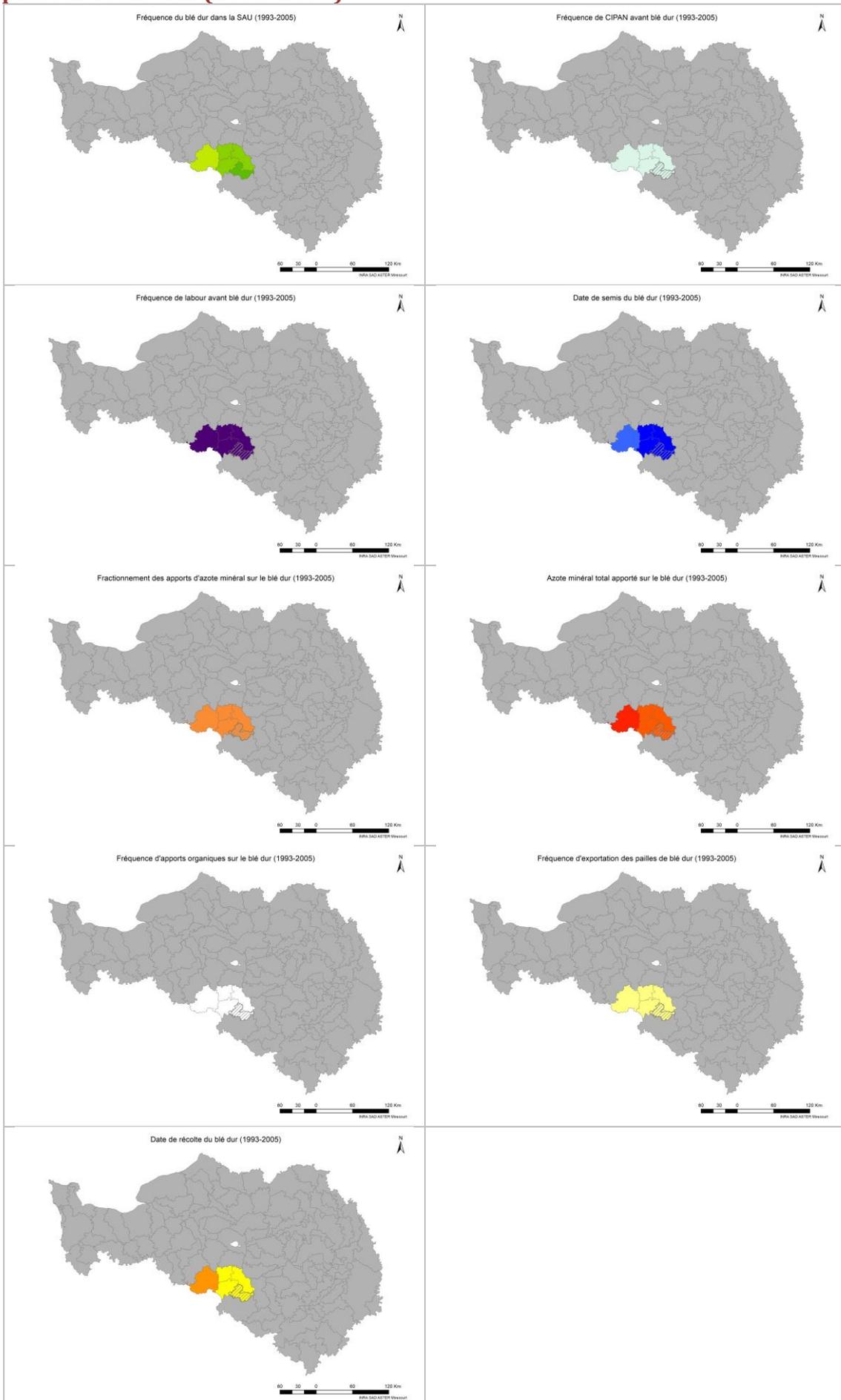
Pratiques sur le blé dur (1970-1980)



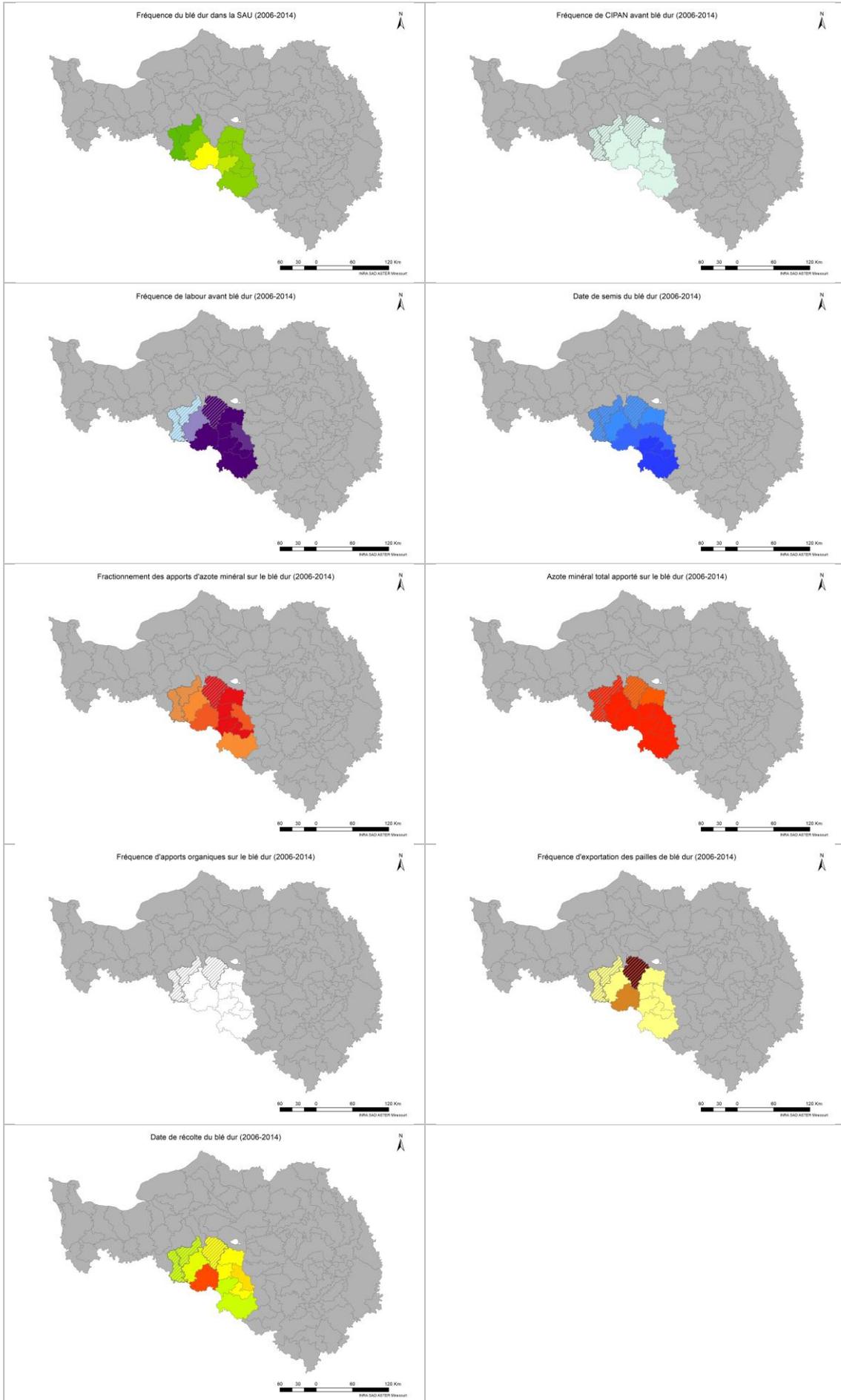
Pratiques sur le blé dur (1981-1992)



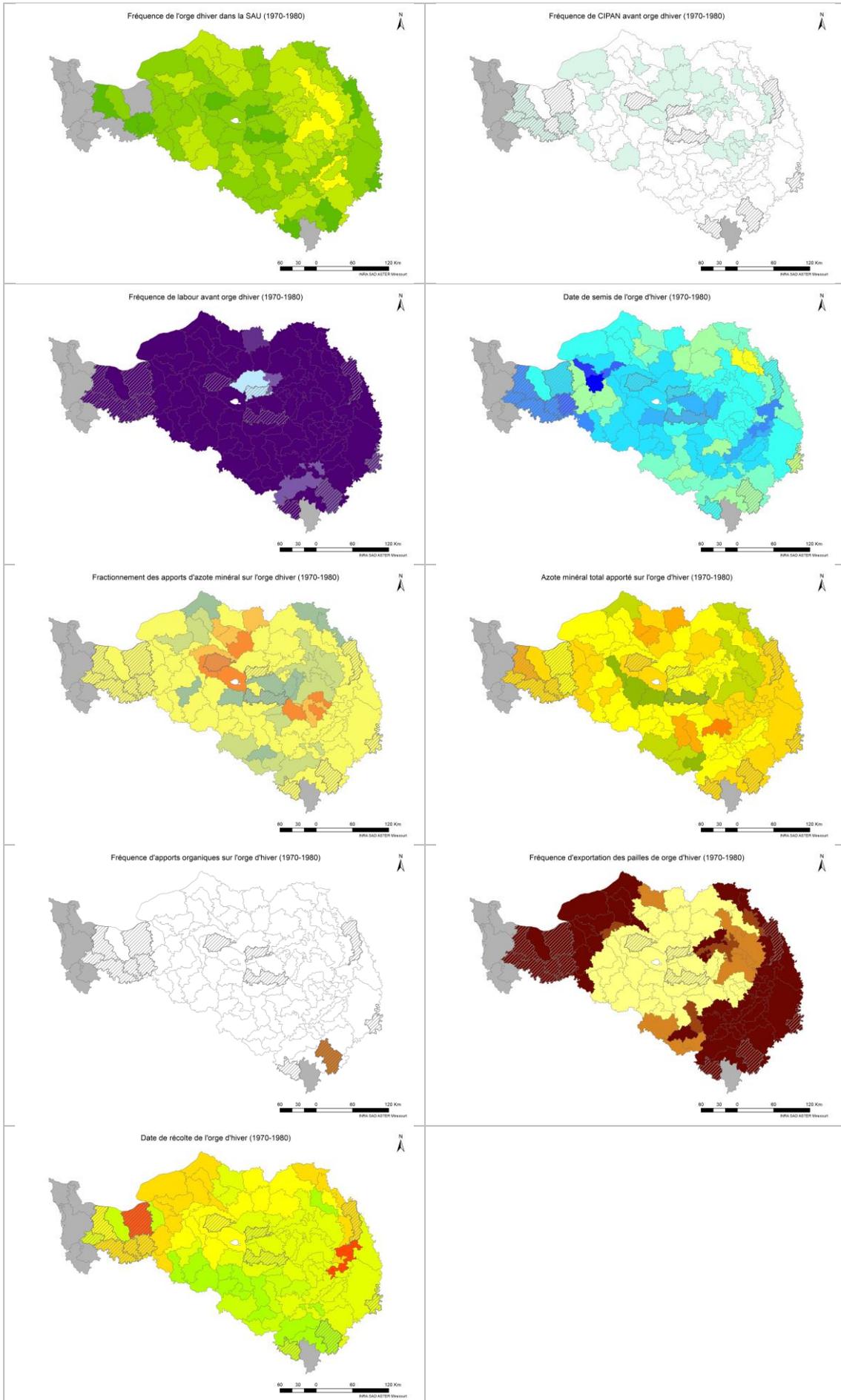
Pratiques sur le blé dur (1993-2005)



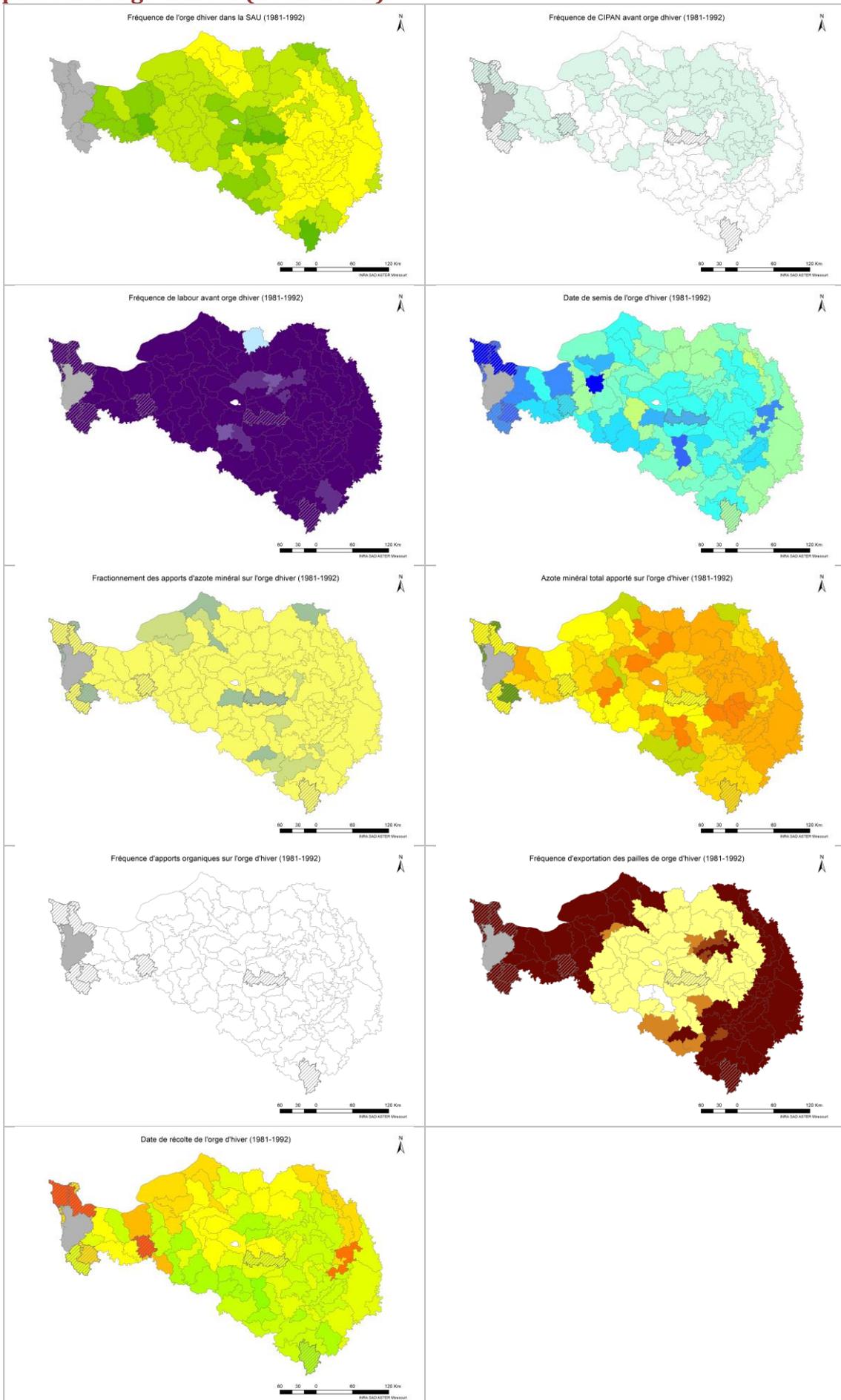
Pratiques sur le blé dur (2006-2014)



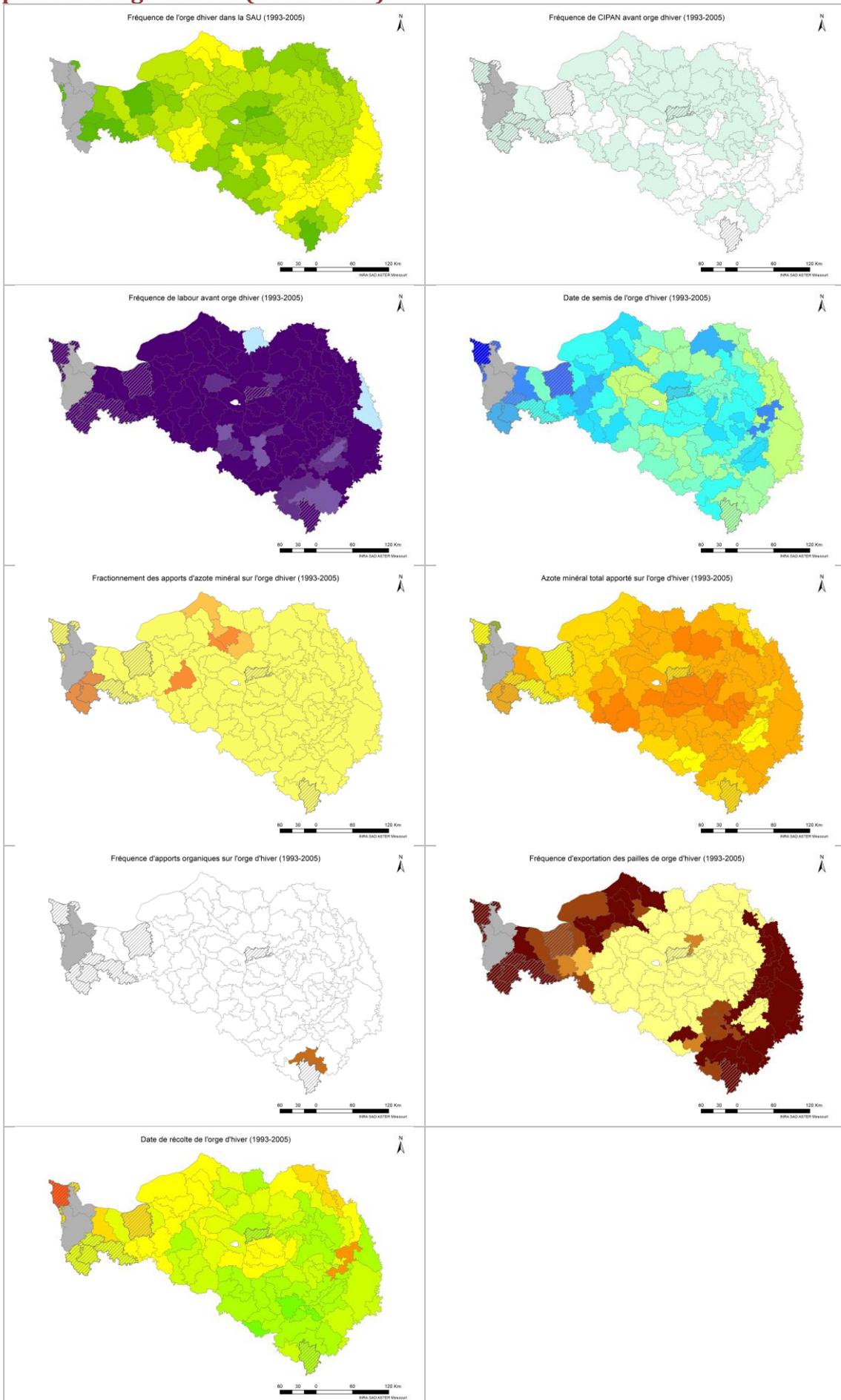
Pratiques sur l'orge d'hiver (1970-1980)



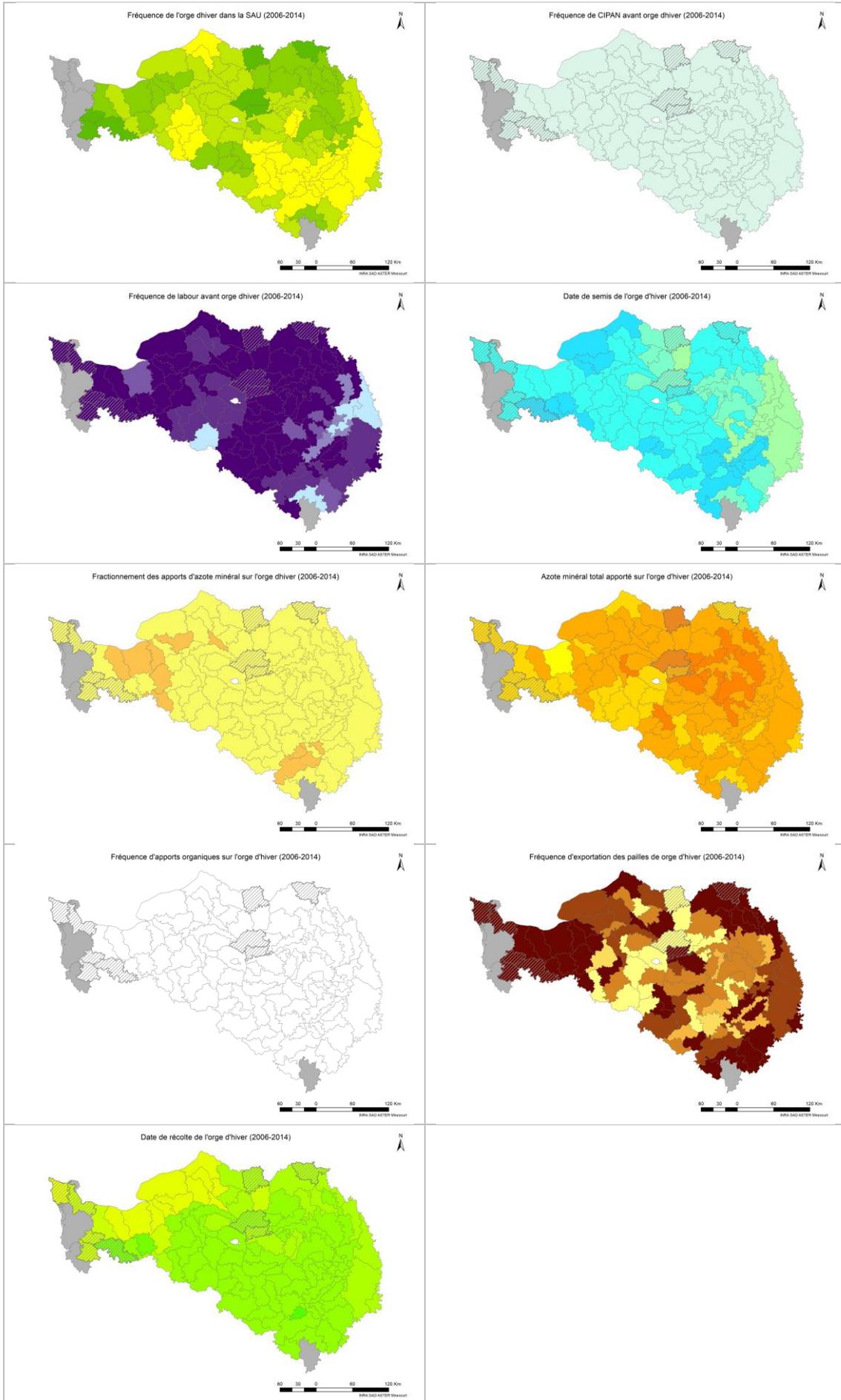
Pratiques sur l'orge d'hiver (1981-1992)



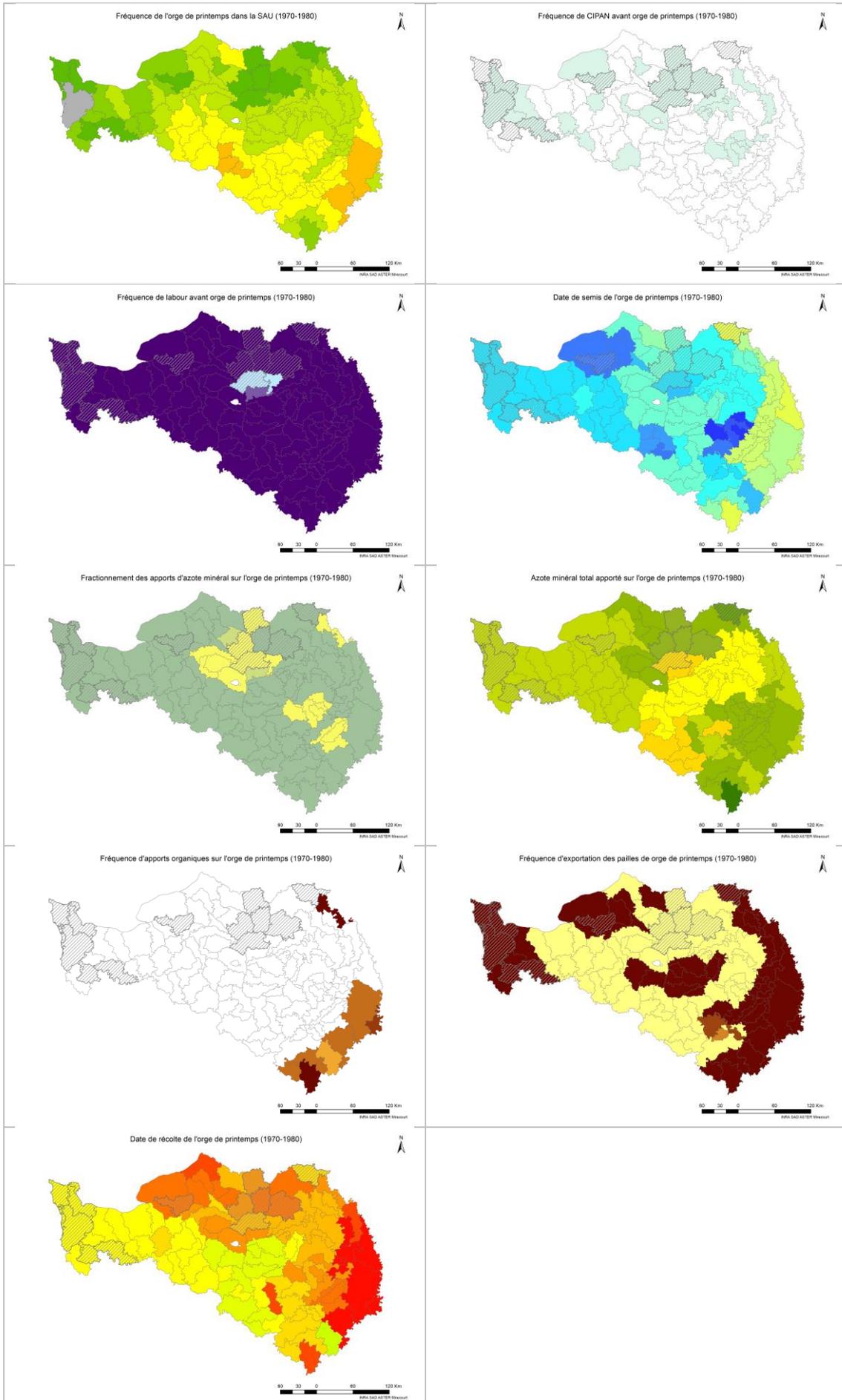
Pratiques sur l'orge d'hiver (1993-2005)



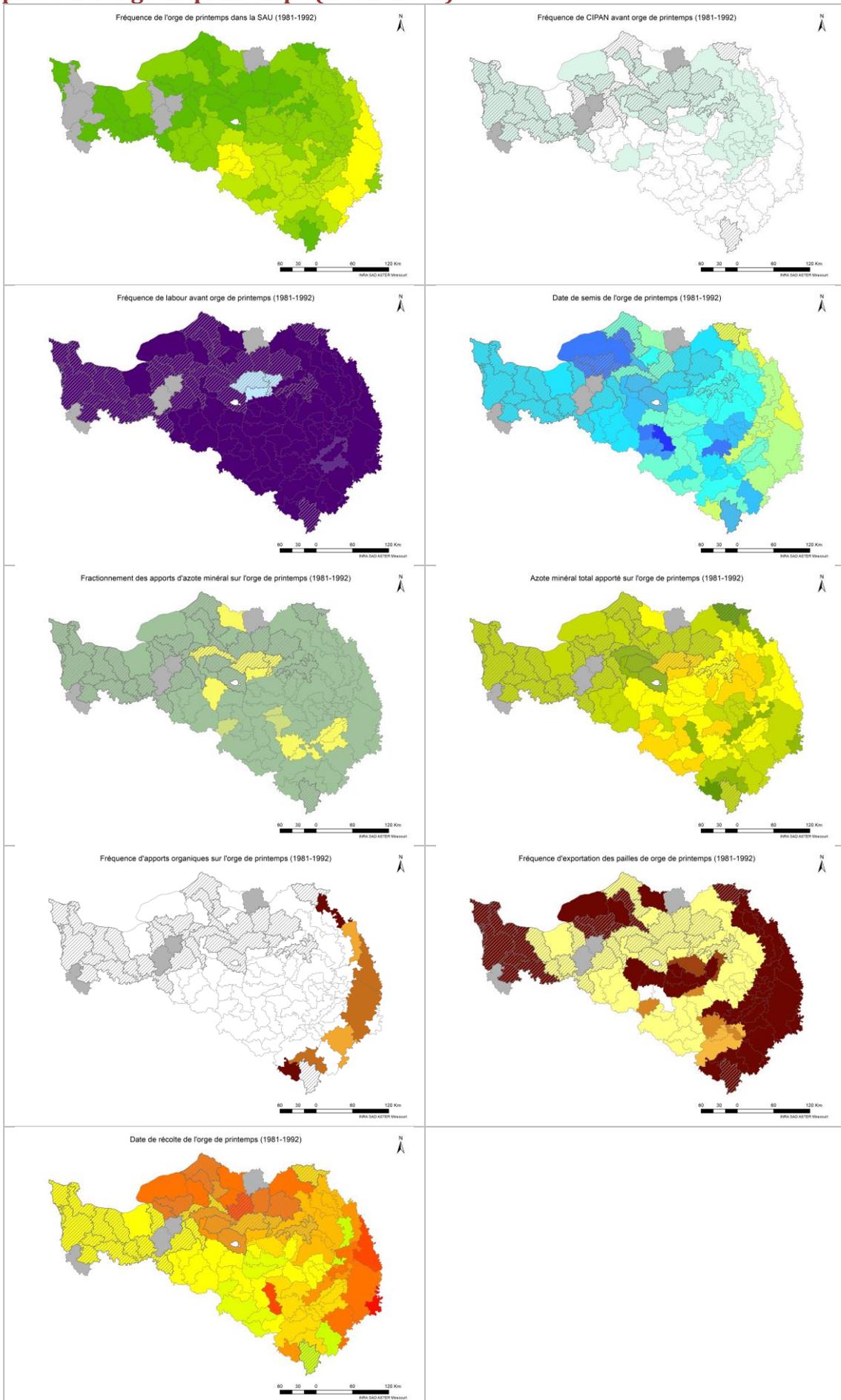
Pratiques sur l'orge d'hiver (2006-2014)



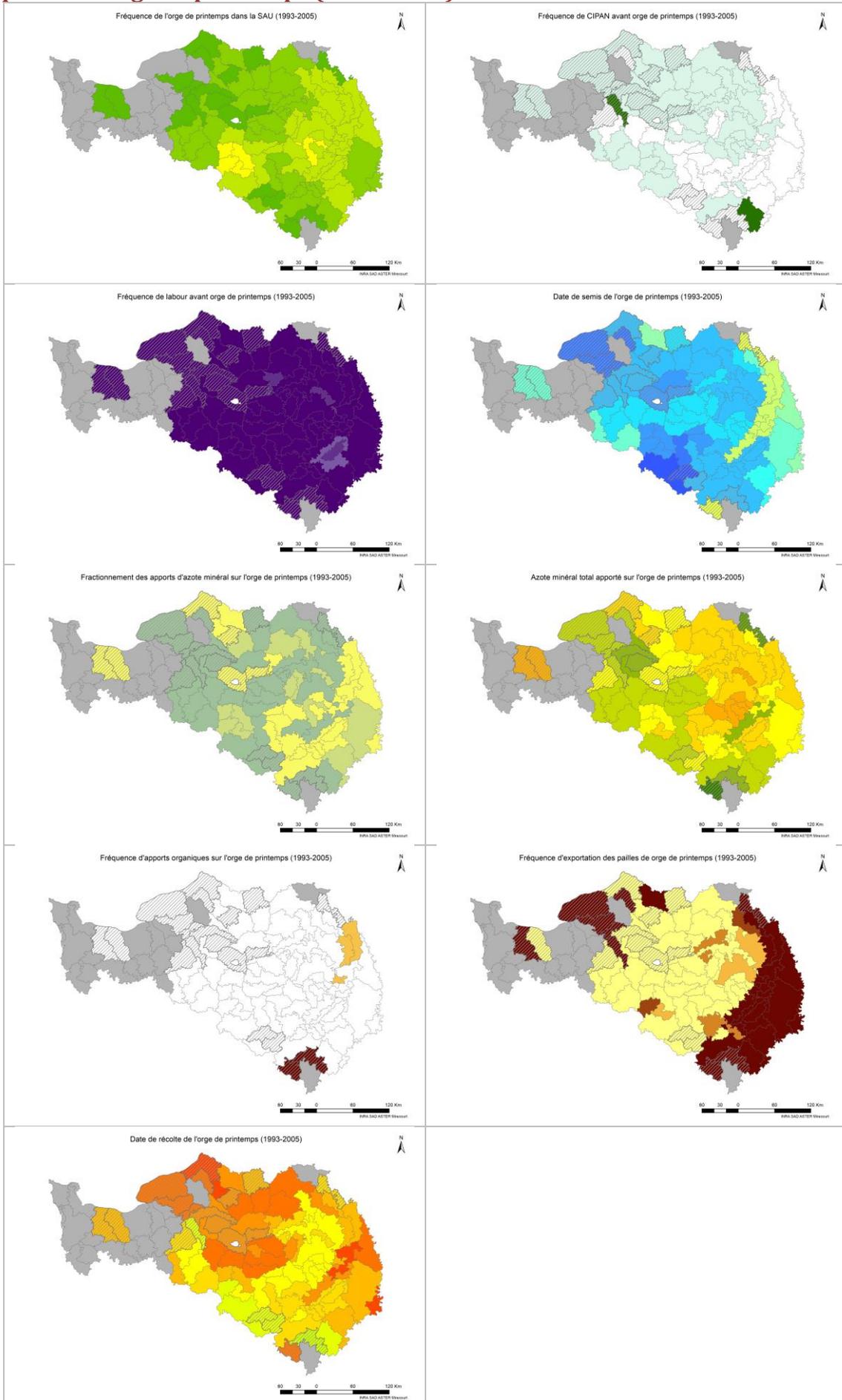
Pratiques sur l'orge de printemps (1970-1980)



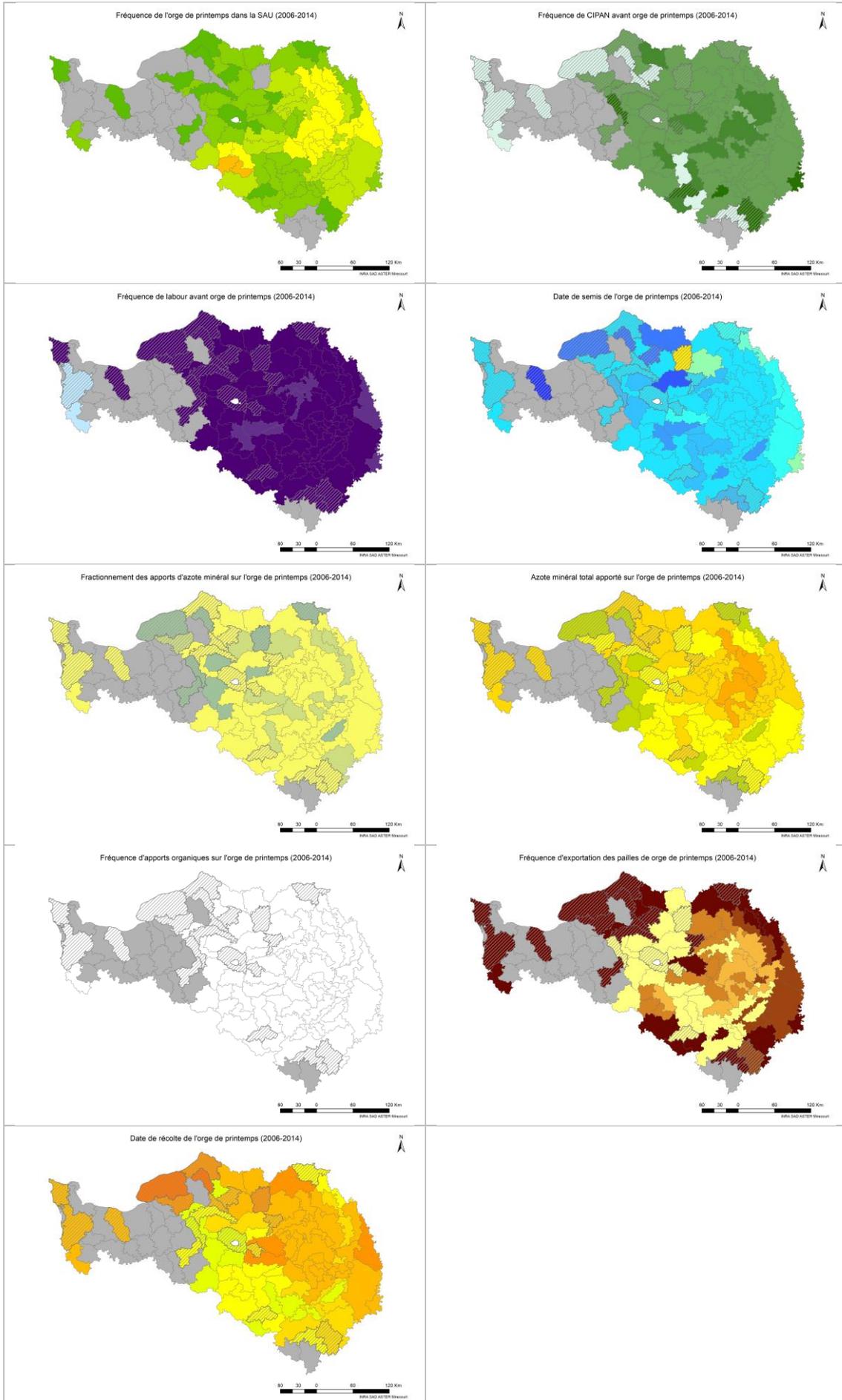
Pratiques sur l'orge de printemps (1981-1992)



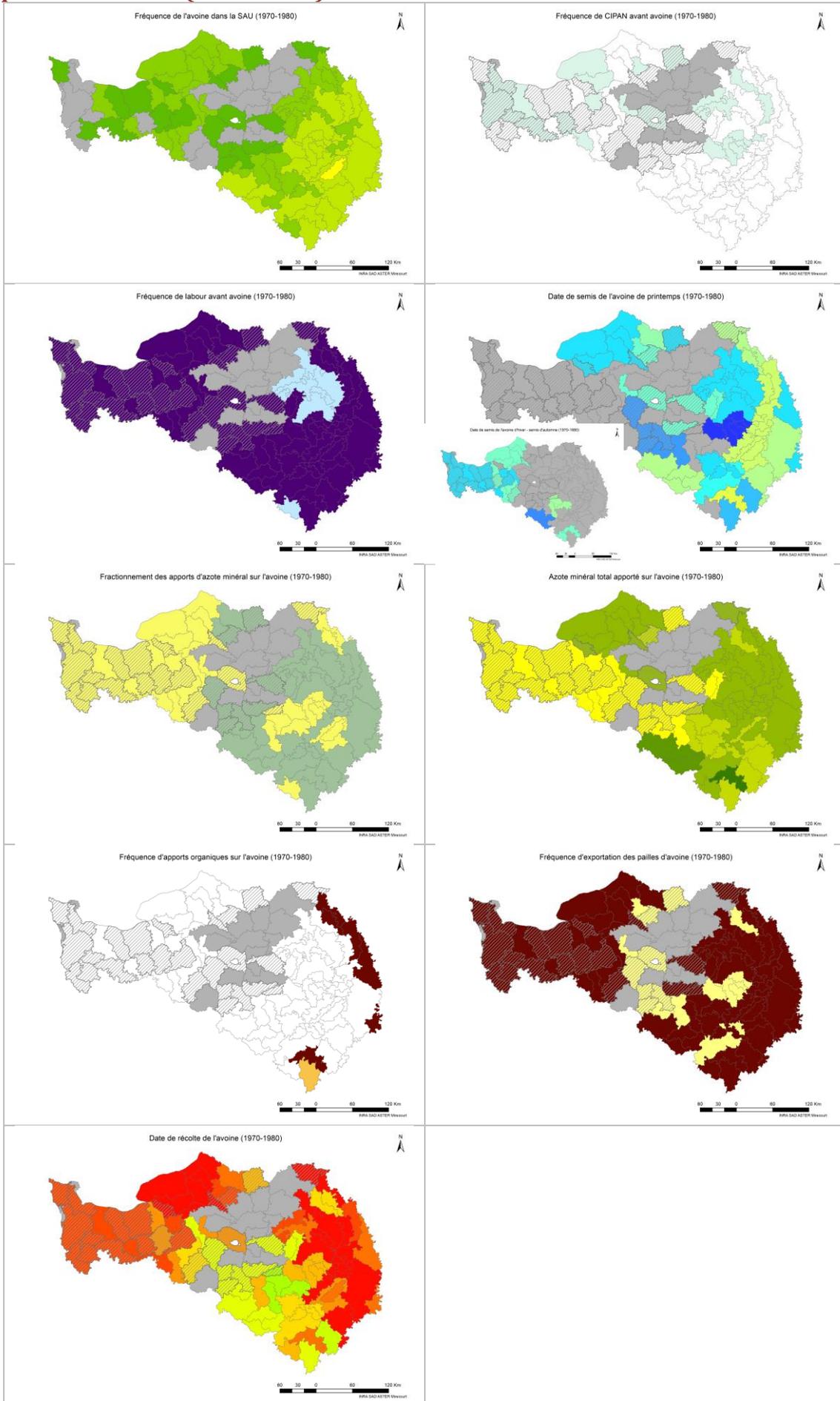
Pratiques sur l'orge de printemps (1993-2005)



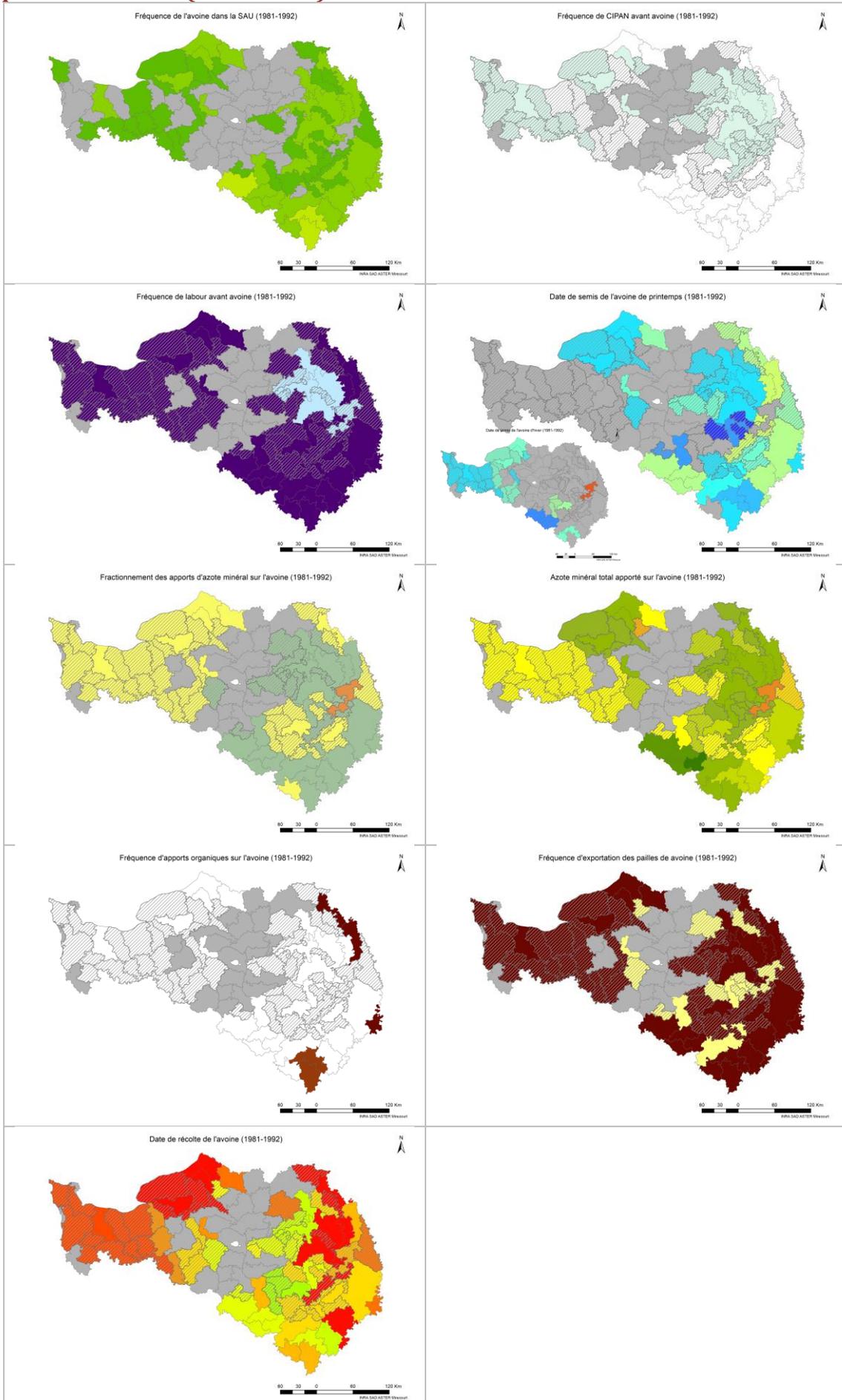
Pratiques sur l'orge de printemps (2006-2014)



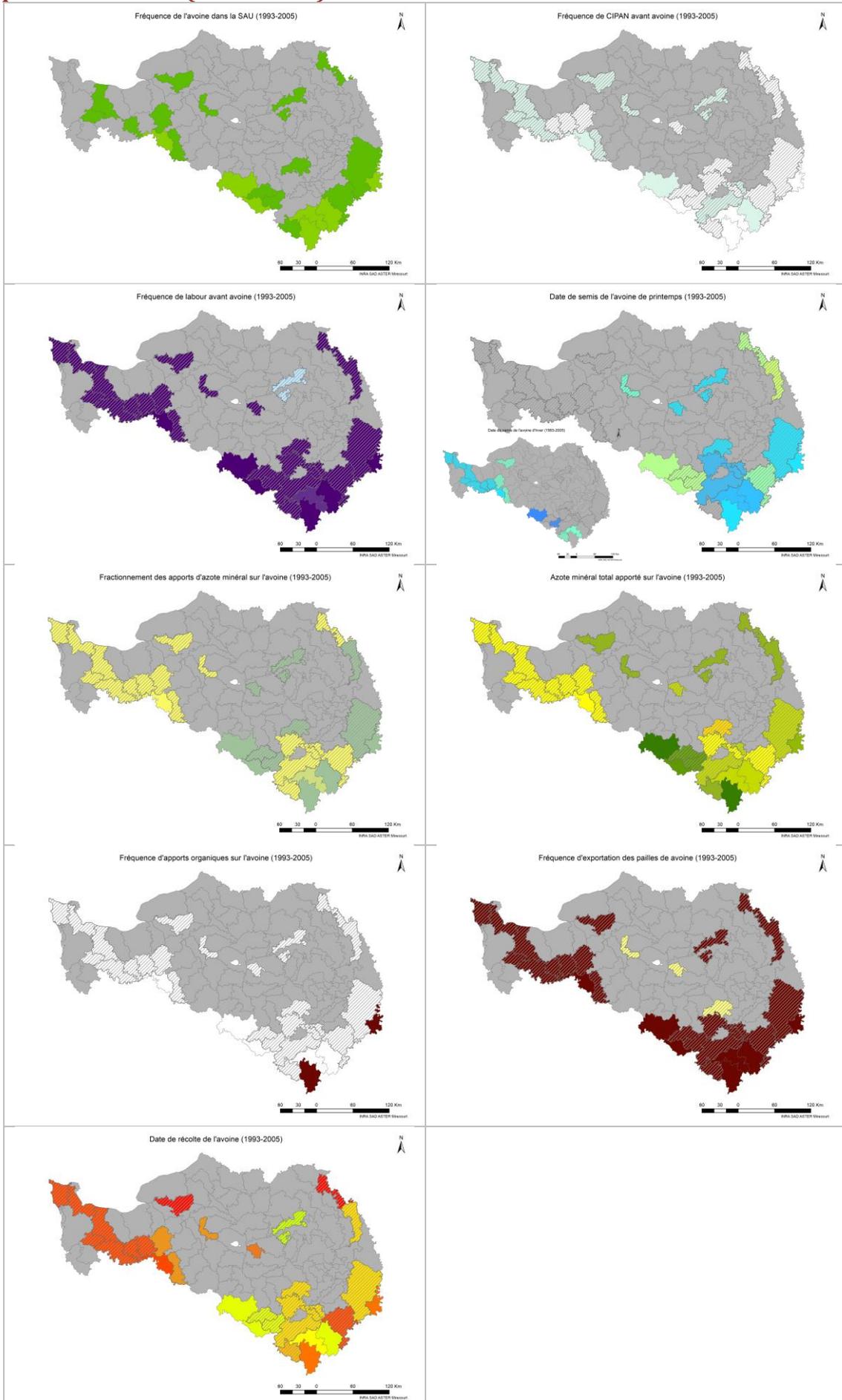
Pratiques sur l'avoine (1970-1980)



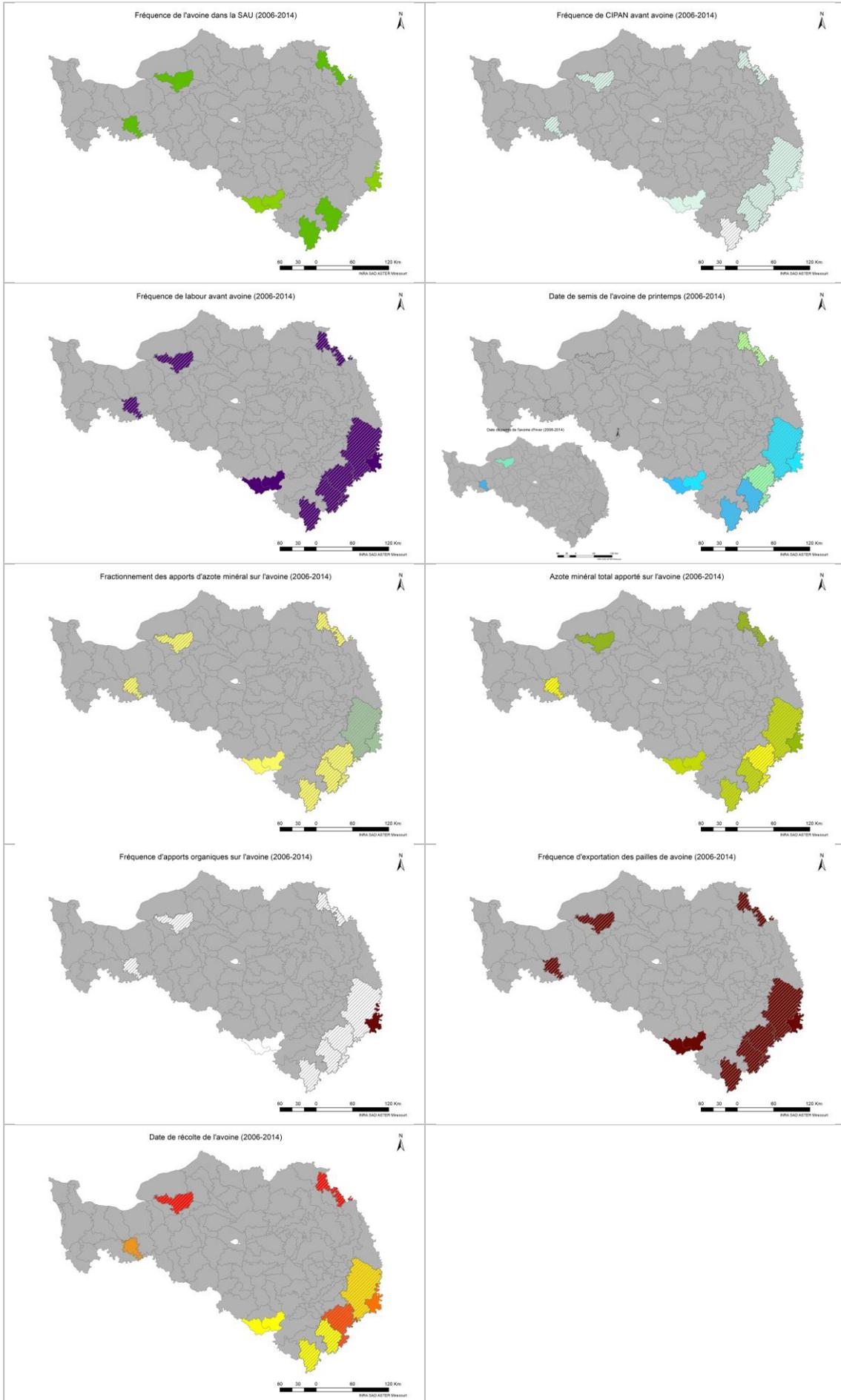
Pratiques sur l'avoine (1981-1992)



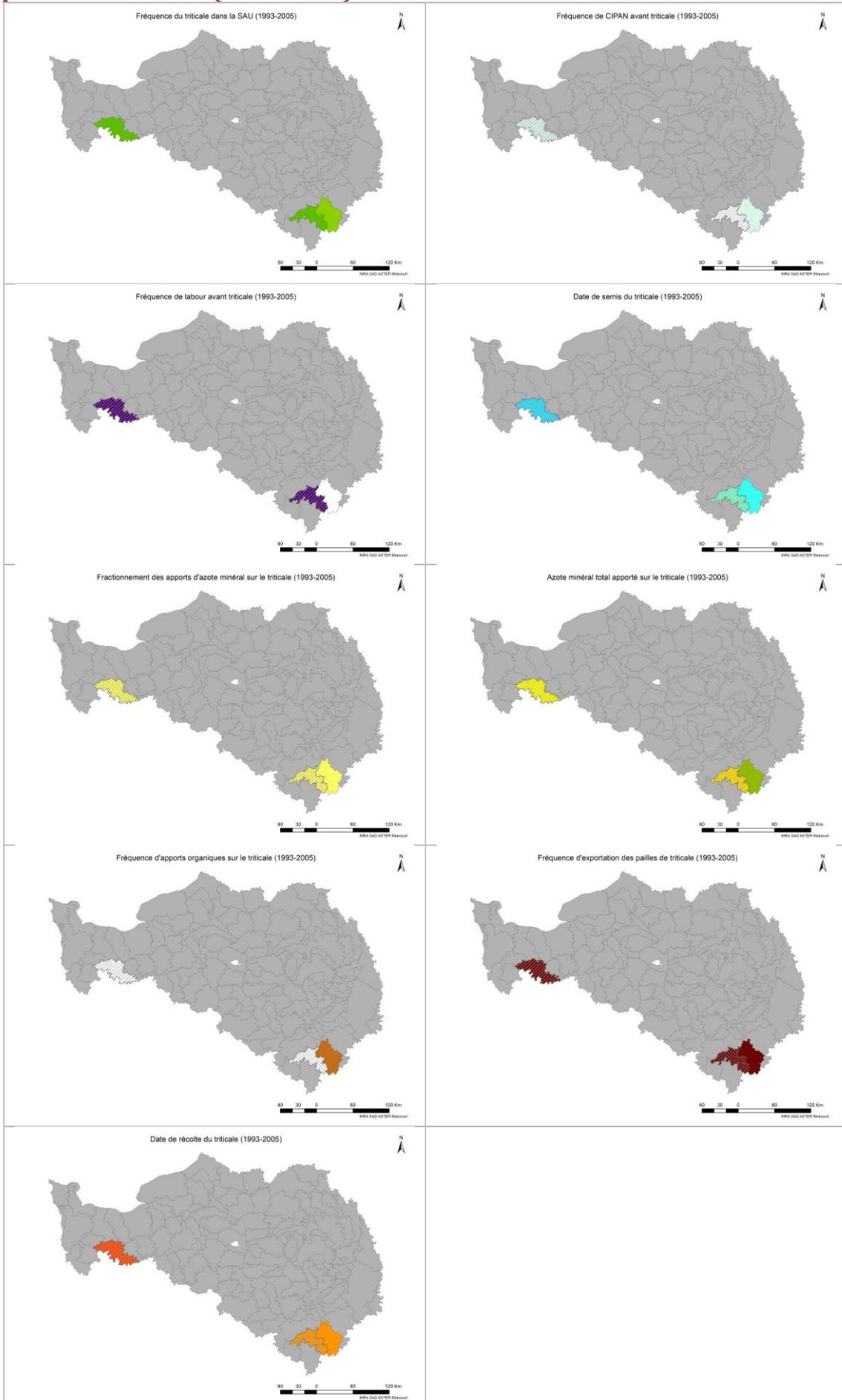
Pratiques sur l'avoine (1993-2005)



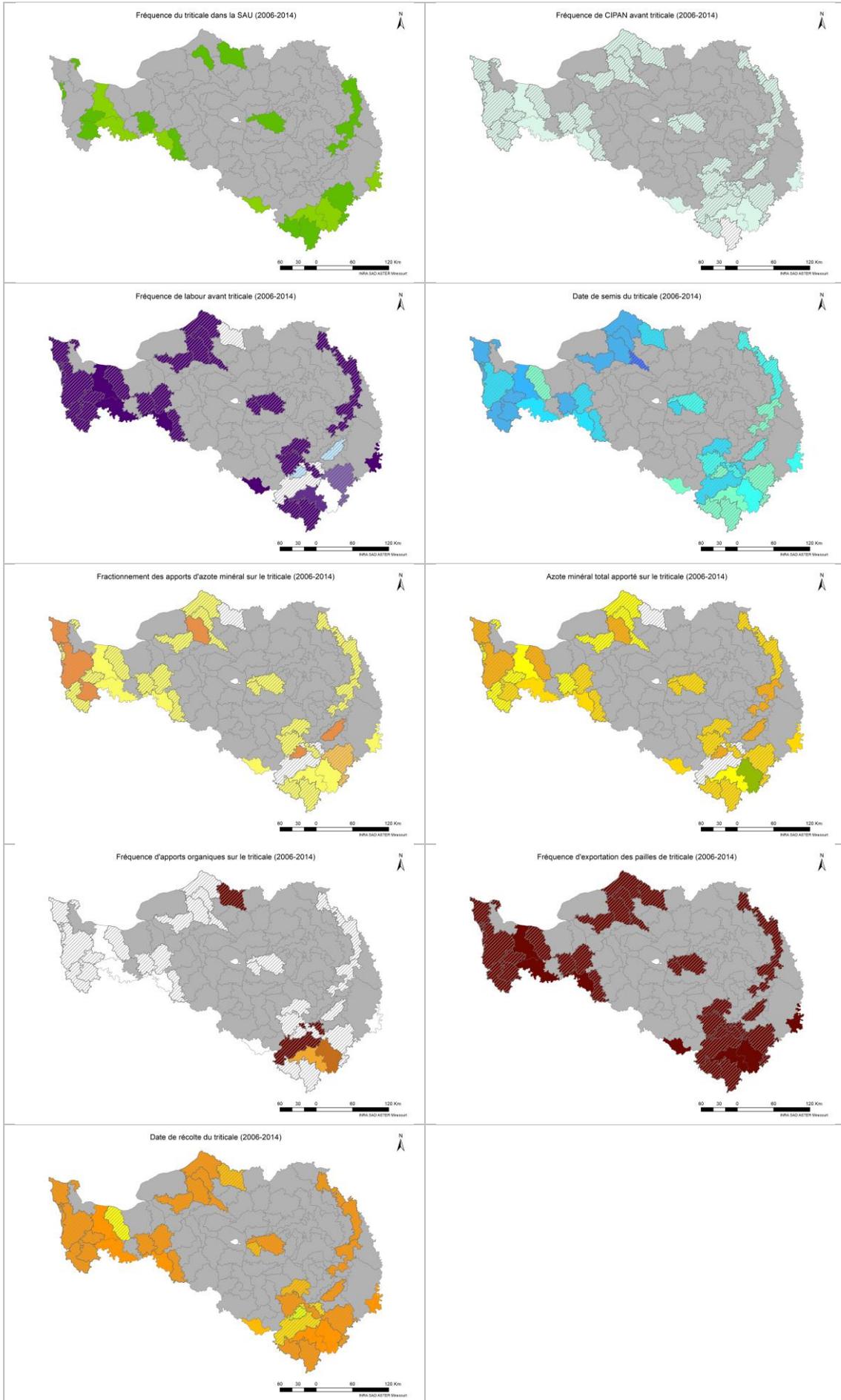
Pratiques sur l'avoine (2006-2013)



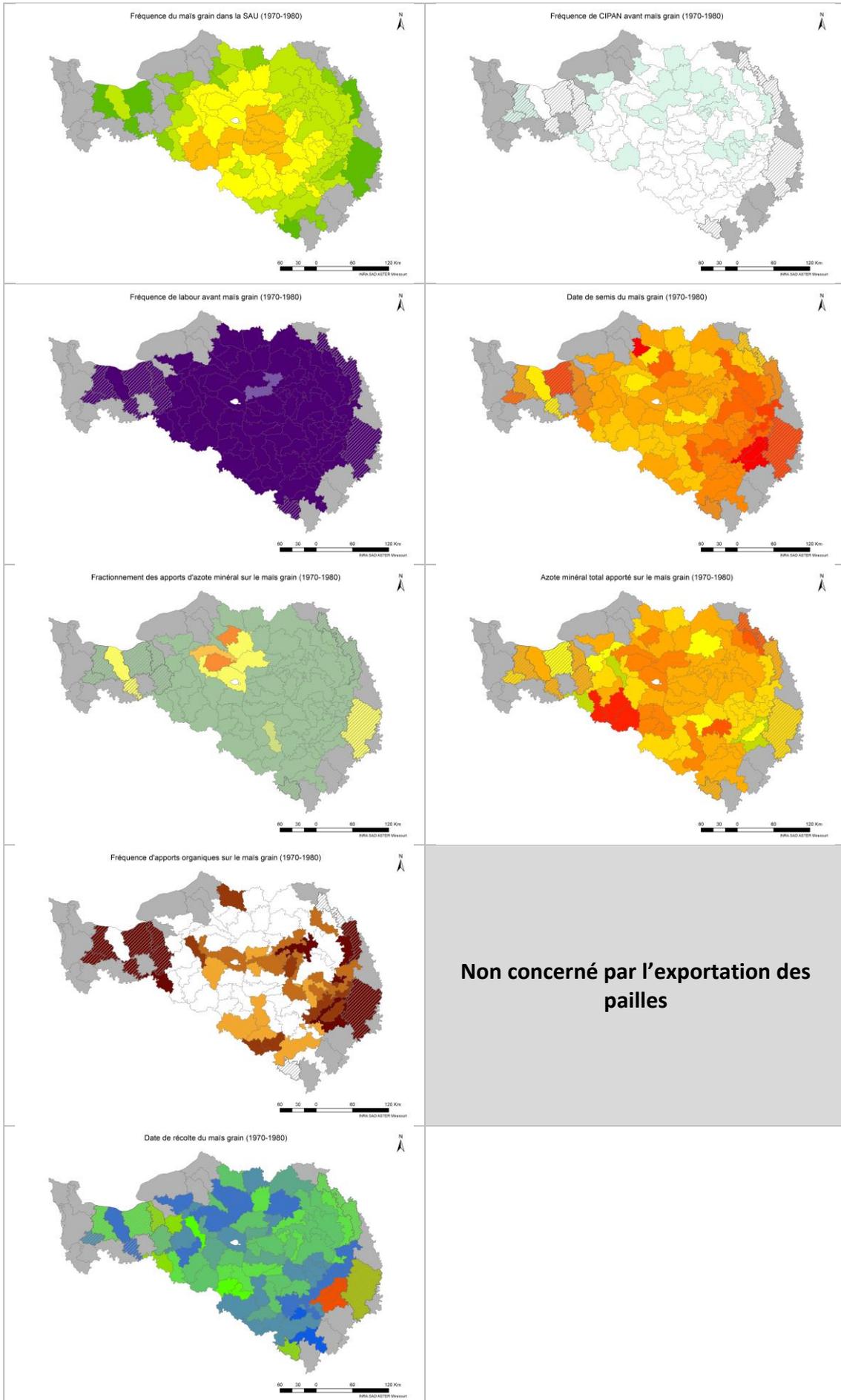
Pratiques sur le triticale (1993-2005)



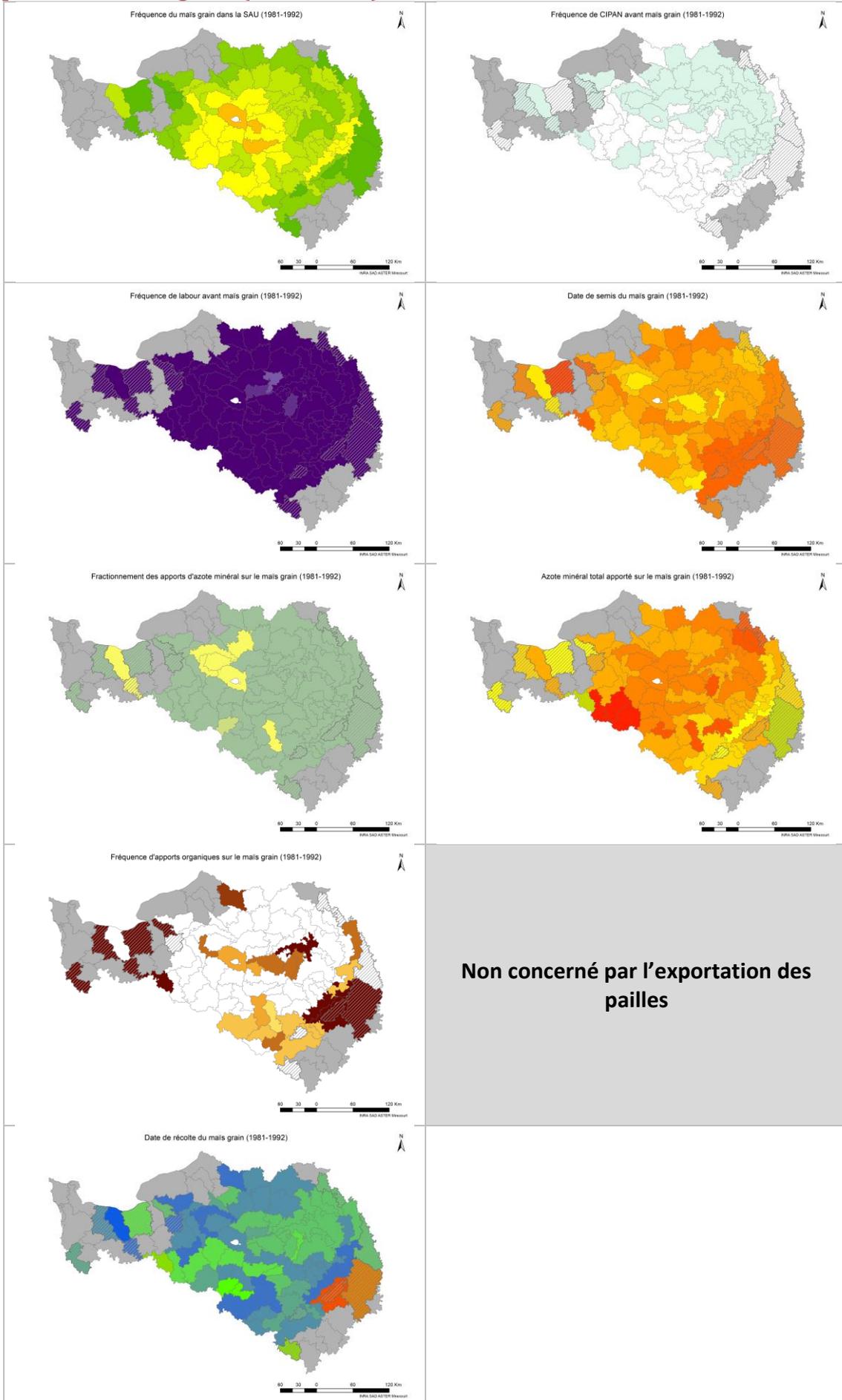
Pratiques sur le triticale (2006-2013)



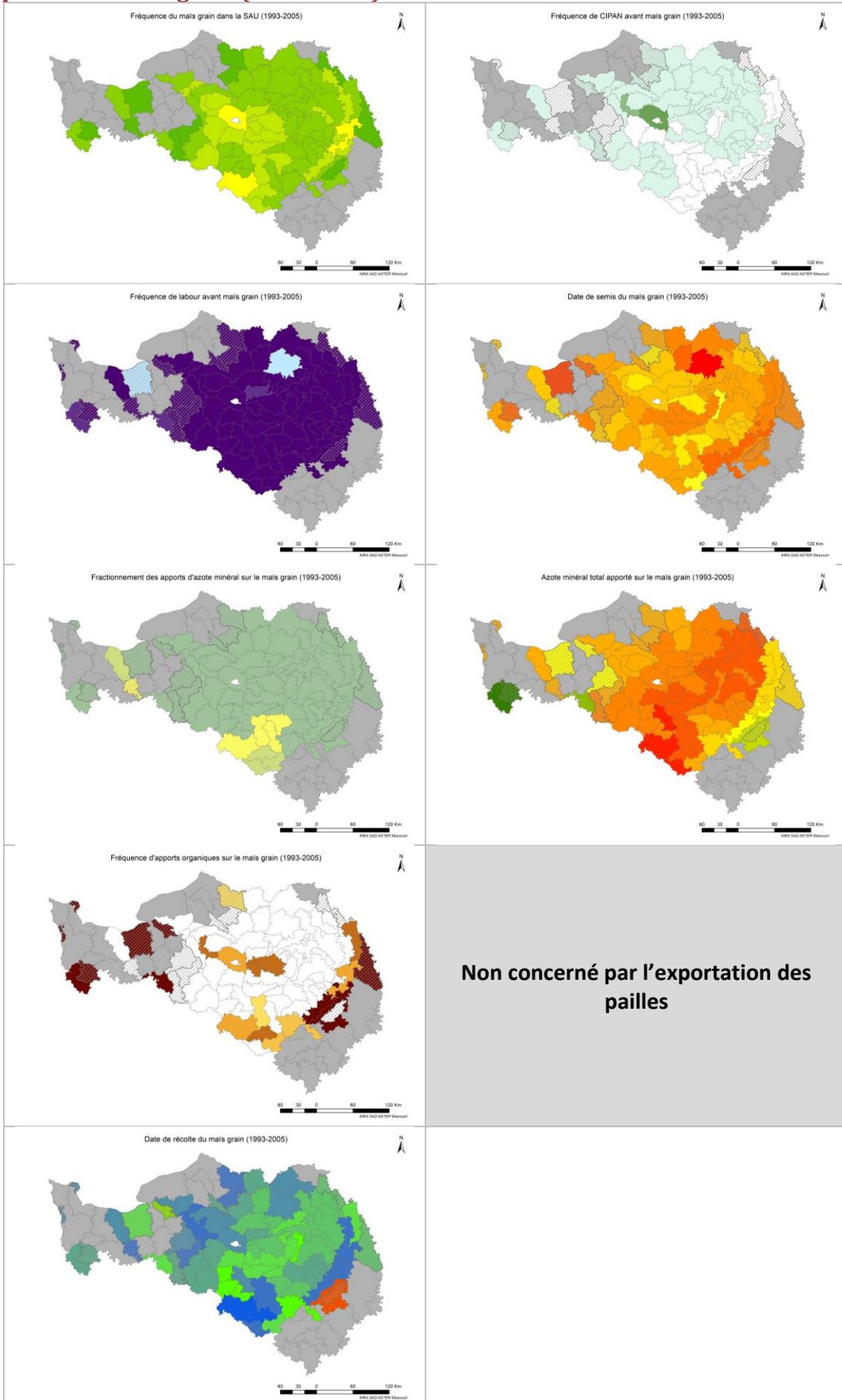
Pratiques sur le maïs grain (1970-1980)



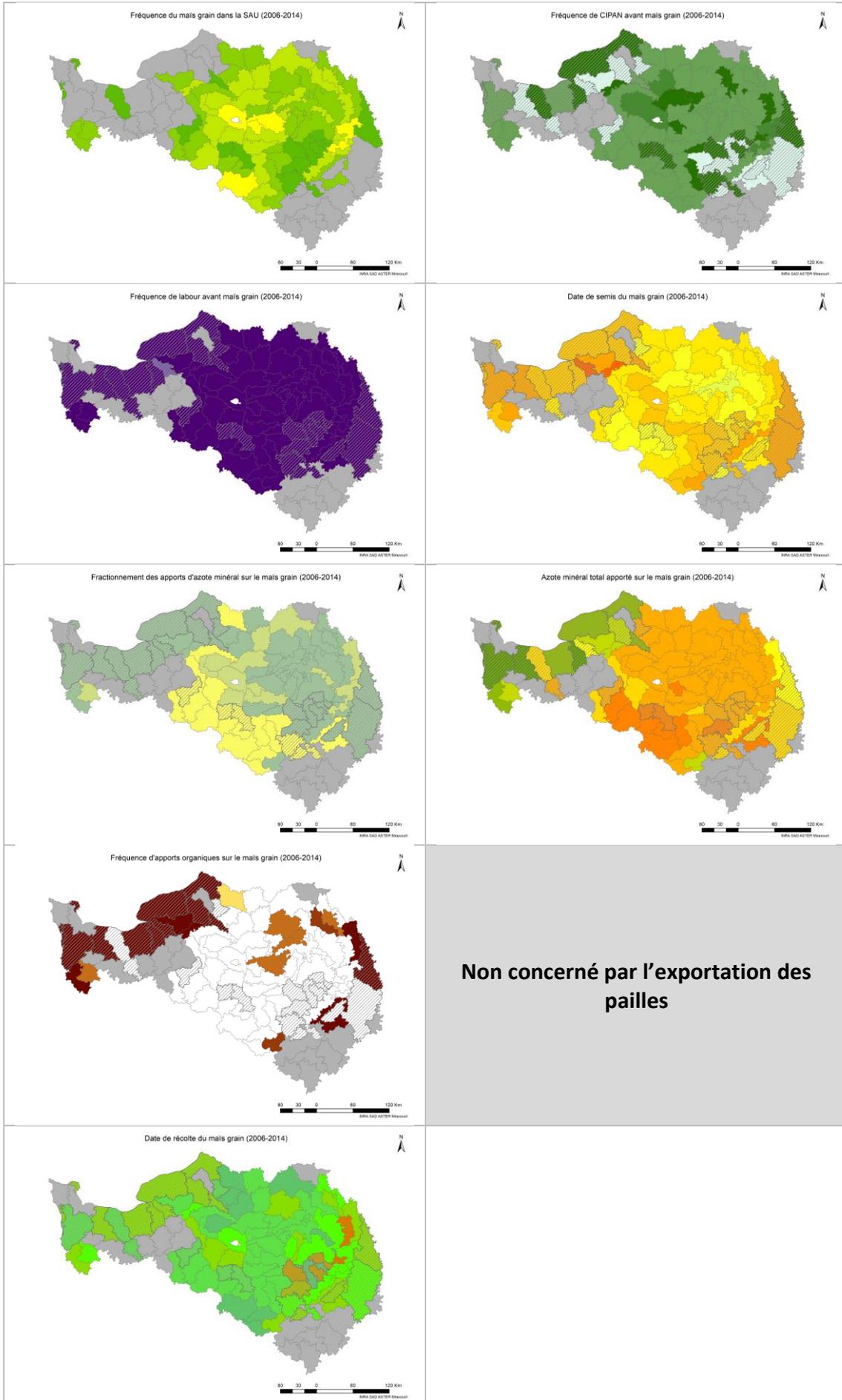
Pratiques sur le maïs grain (1981-1992)



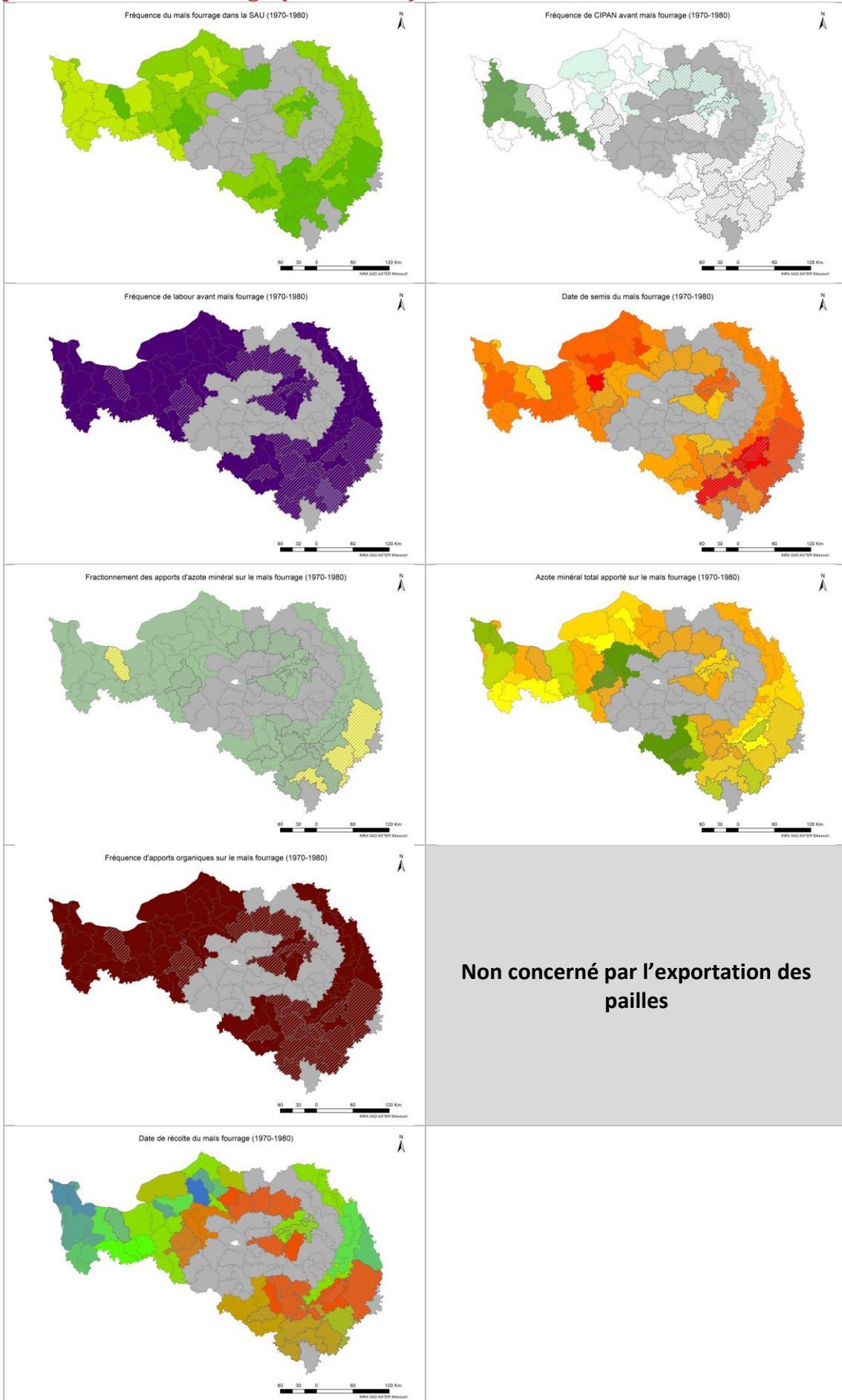
Pratiques sur le maïs grain (1993-2005)



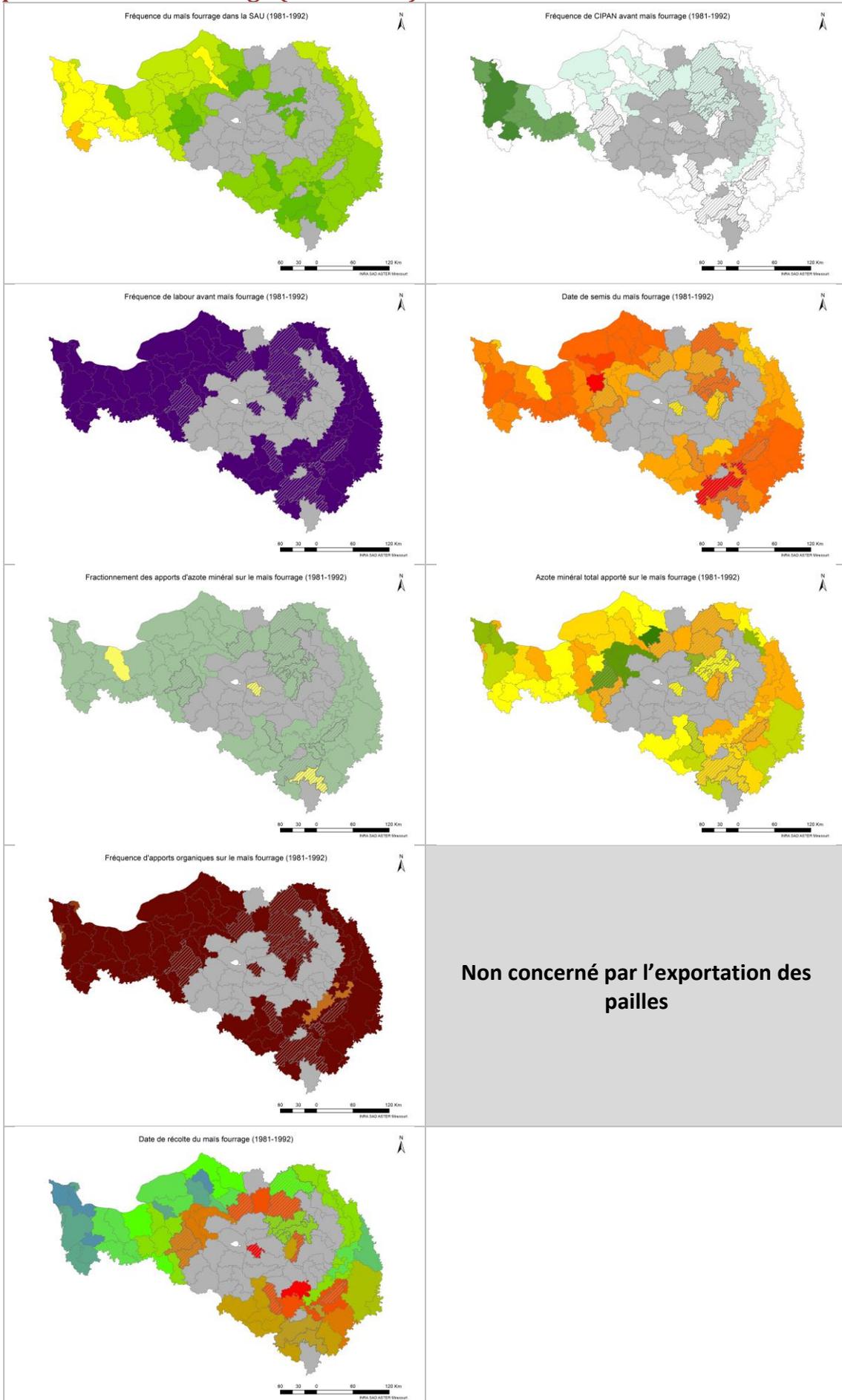
Pratiques sur le maïs grain (2006-2014)



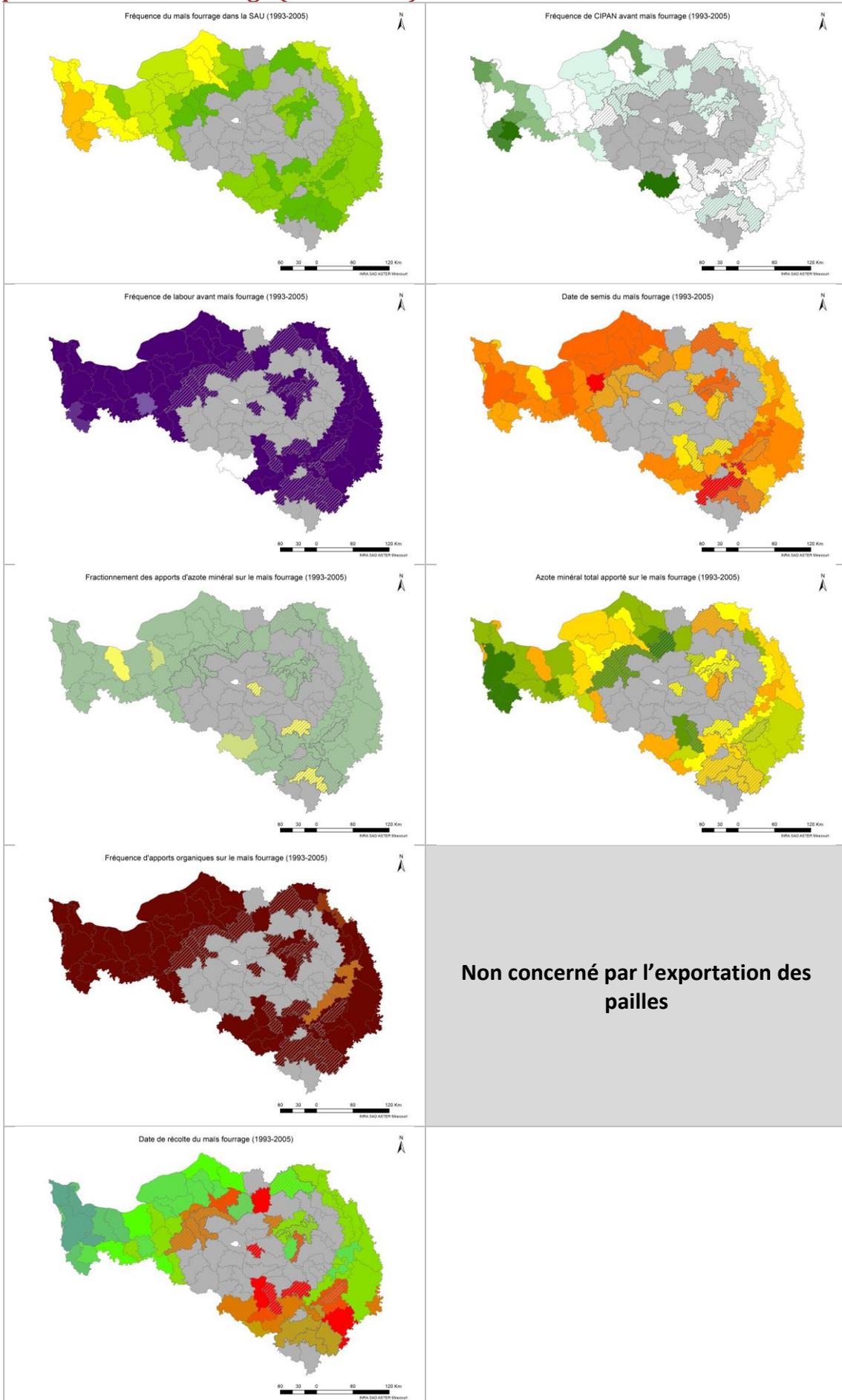
Pratiques sur le maïs fourrage (1970-1980)



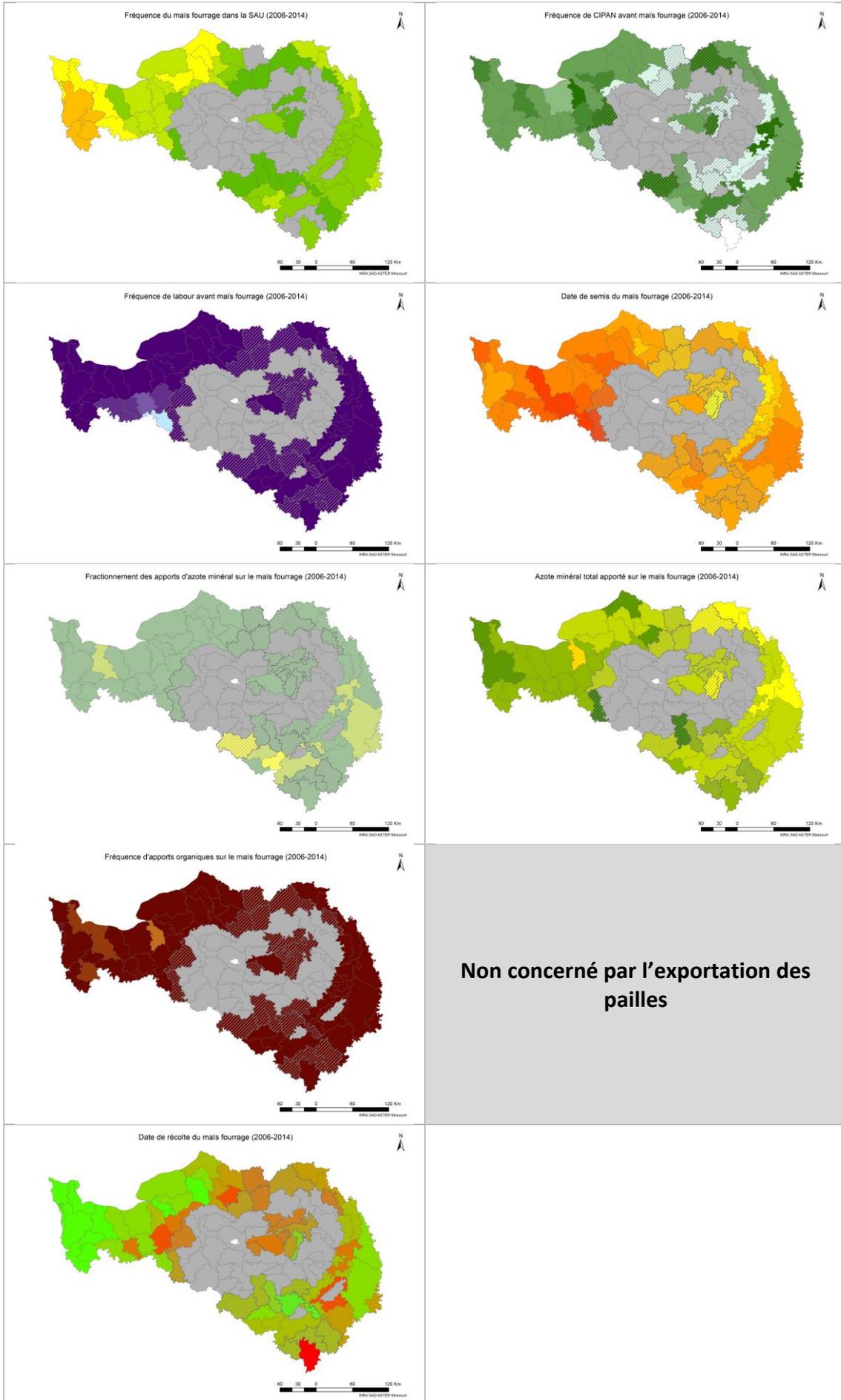
Pratiques sur le maïs fourrage (1981-1992)



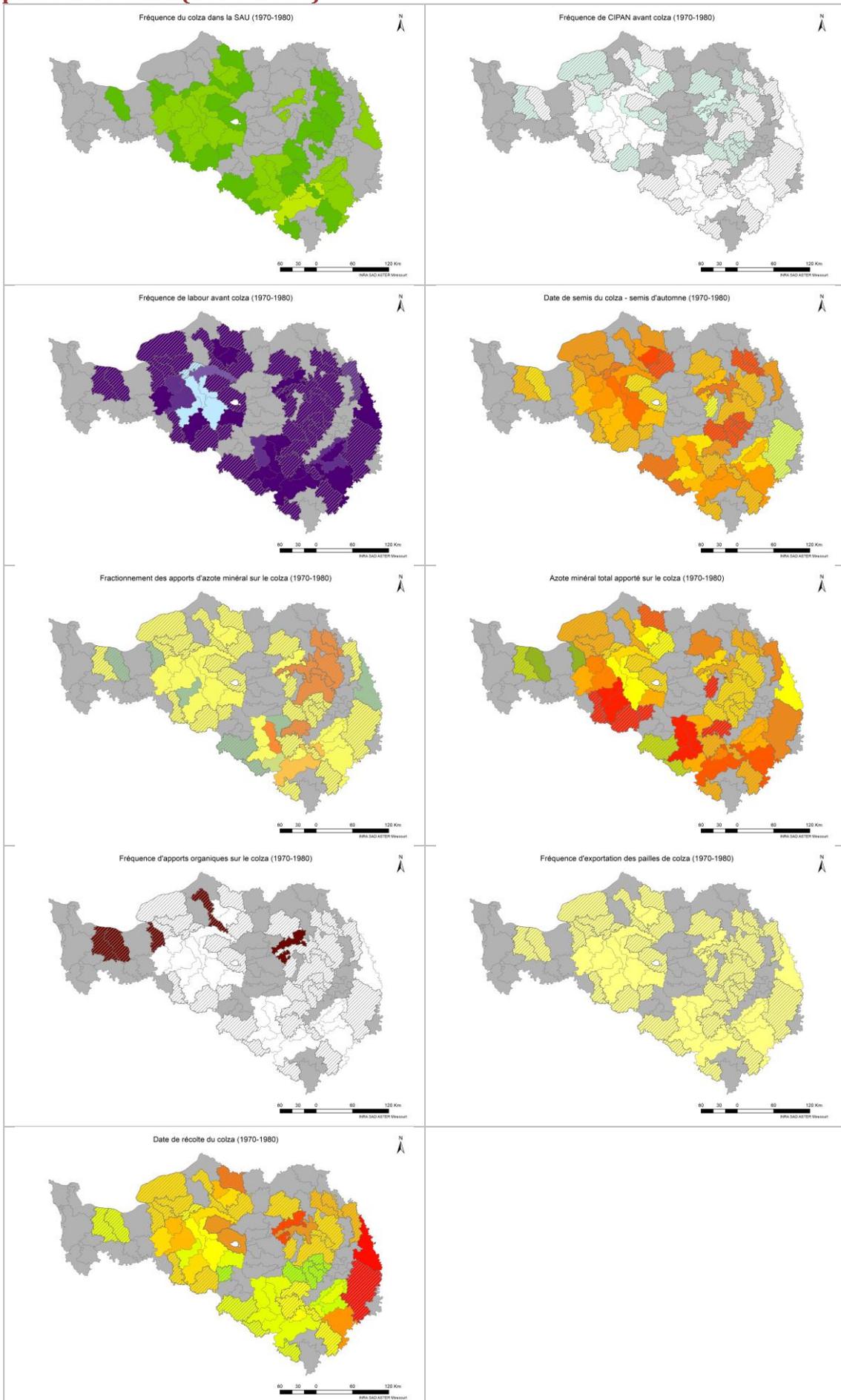
Pratiques sur le maïs fourrage (1993-2005)



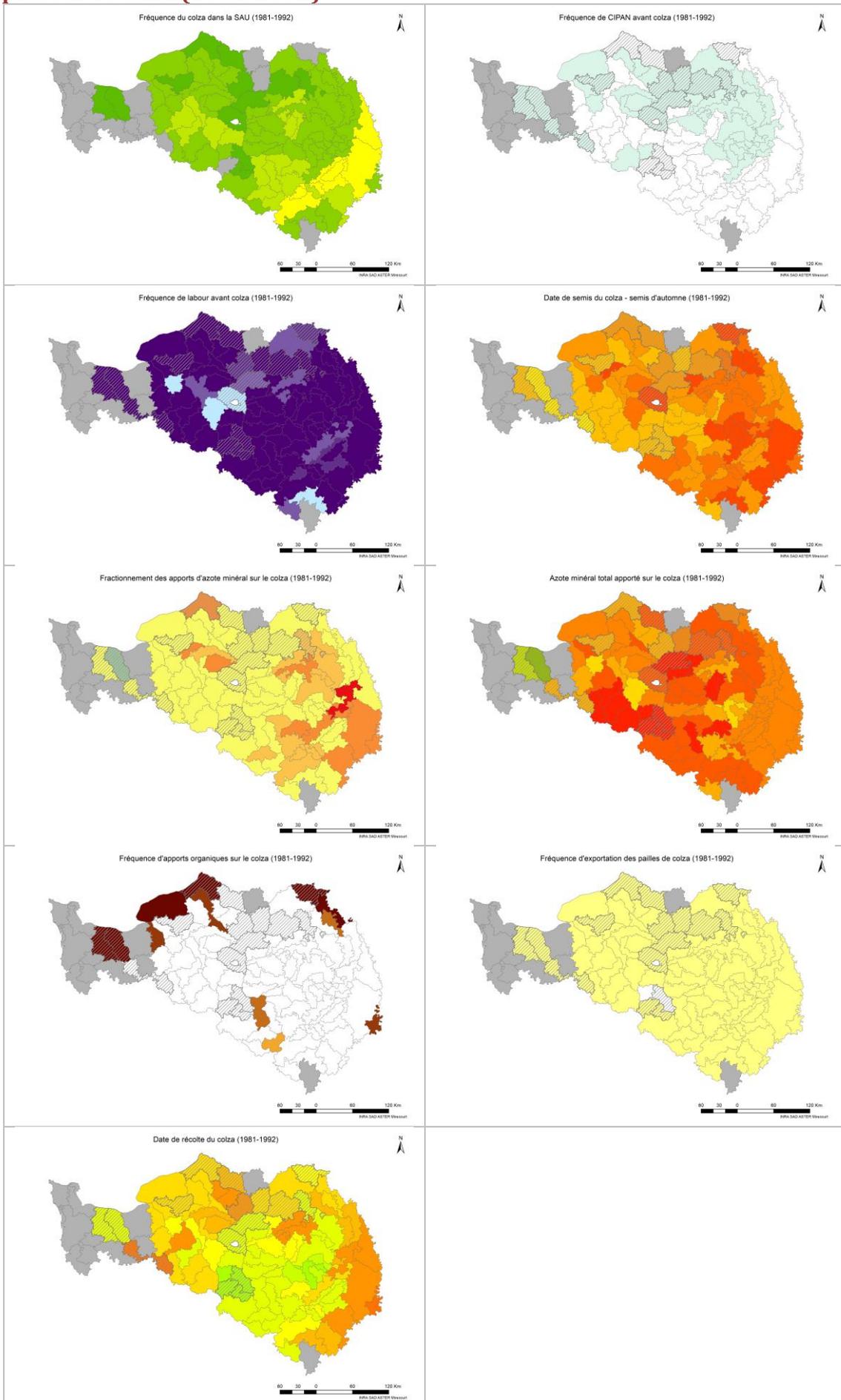
Pratiques sur le maïs fourrage (2006-2013)



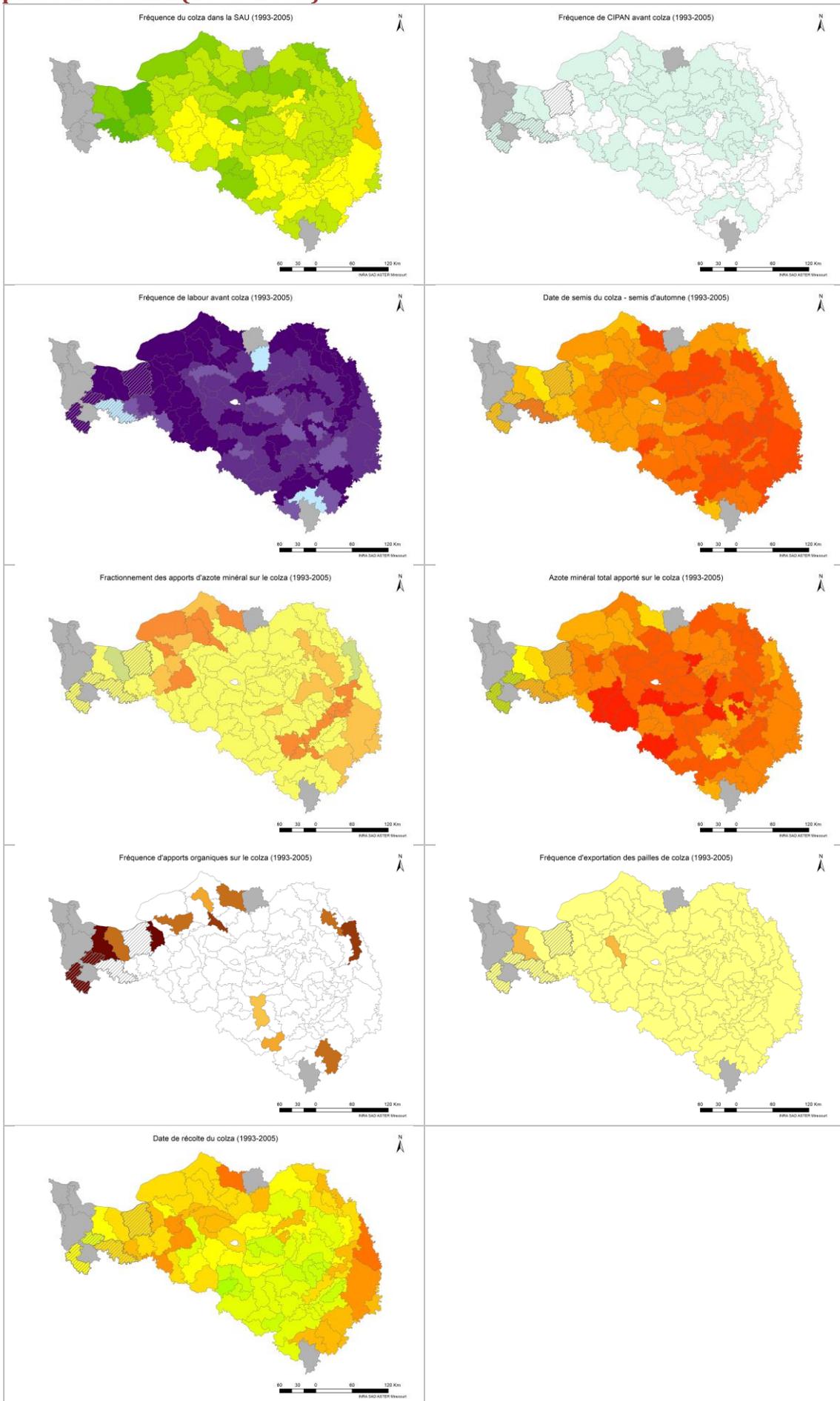
Pratiques sur le colza (1970-1980)



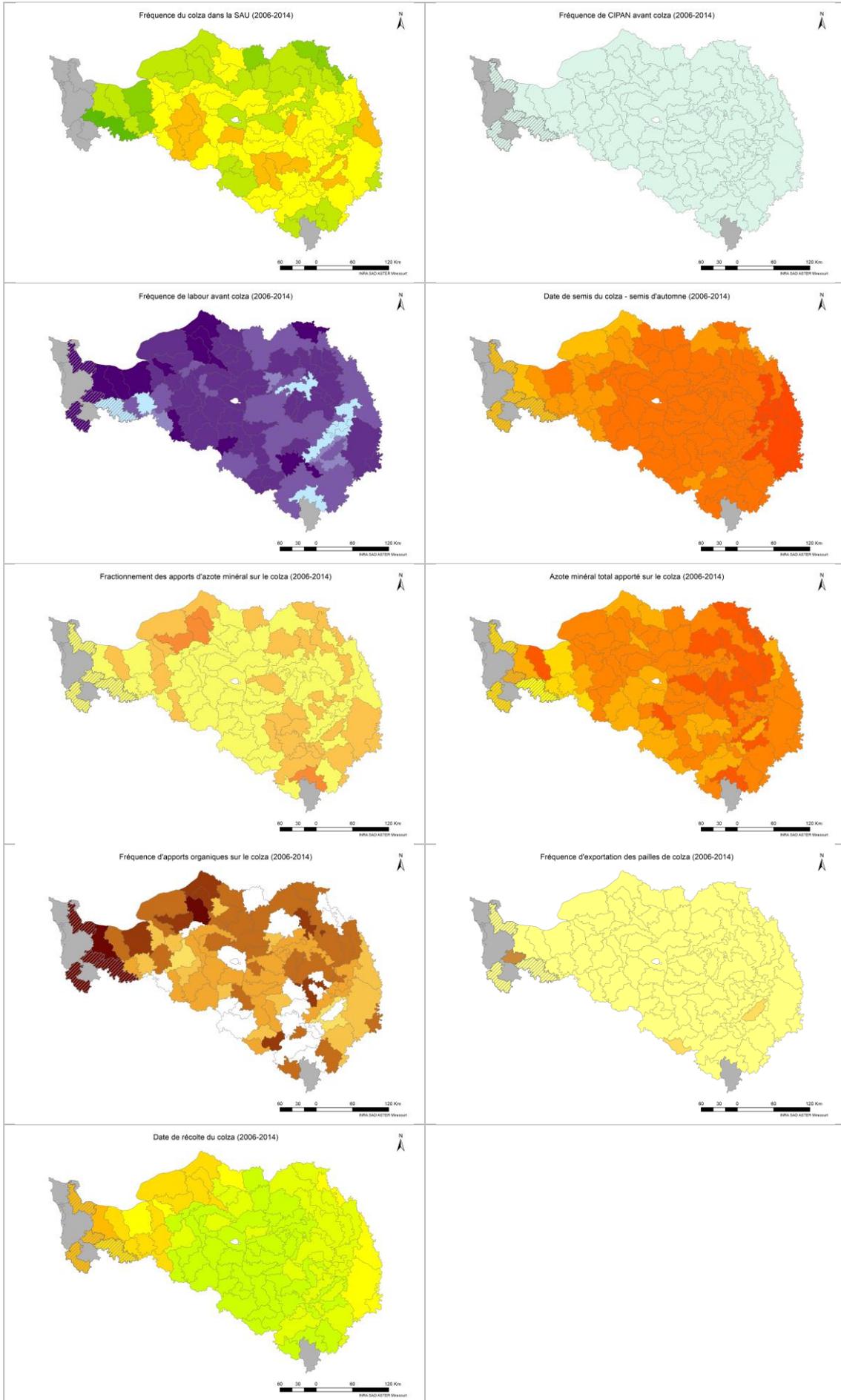
Pratiques sur le colza (1981-1992)



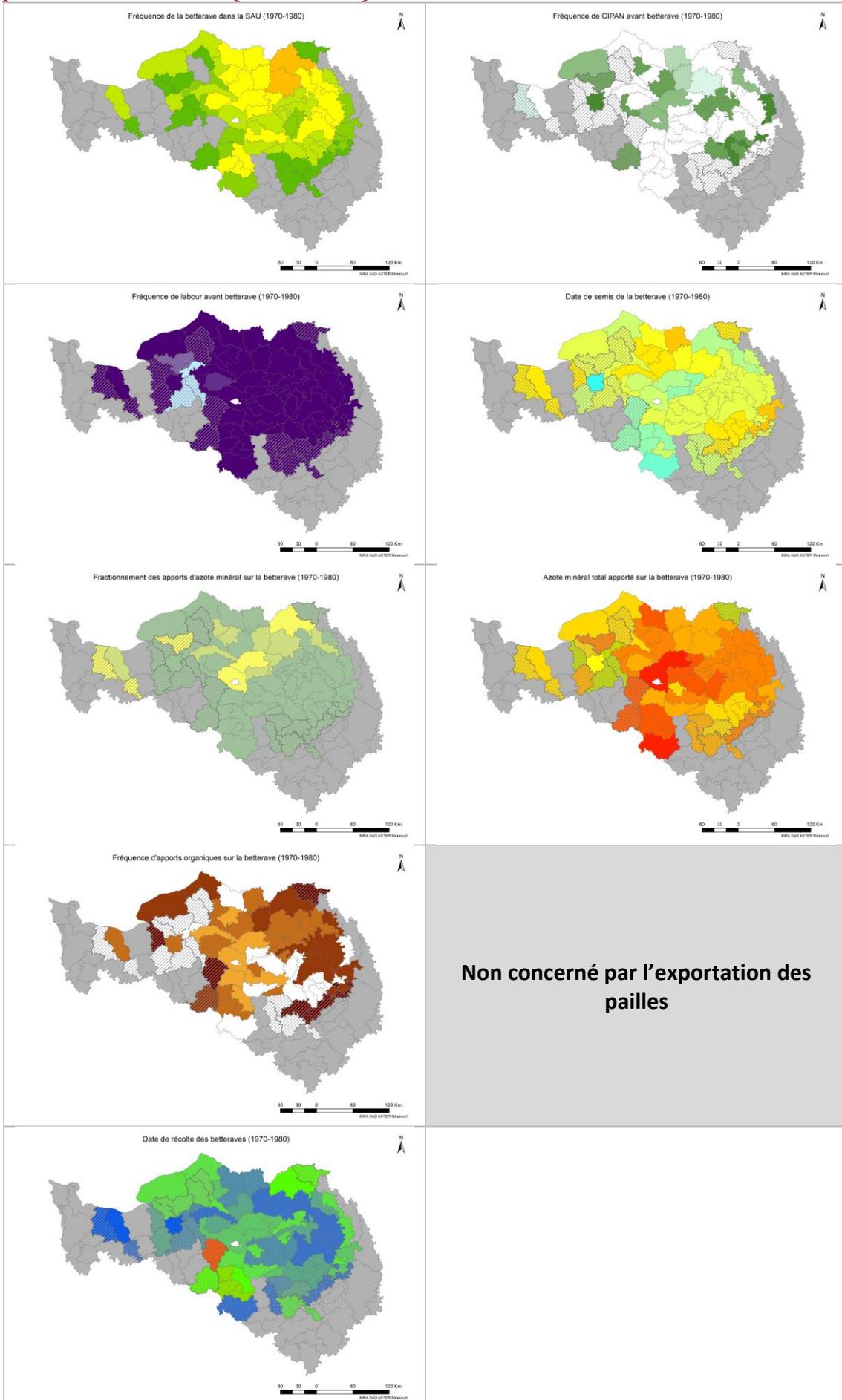
Pratiques sur le colza (1993-2005)



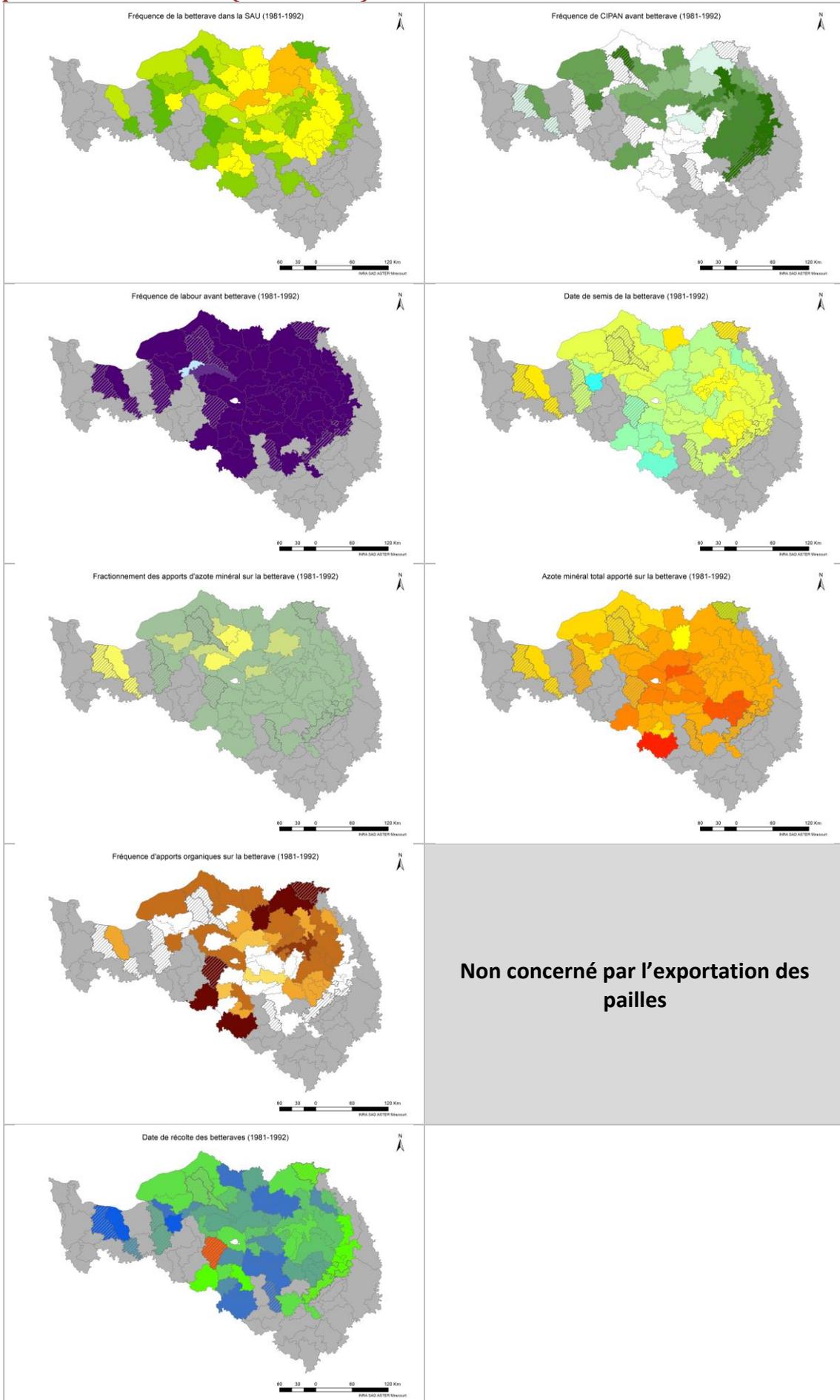
Pratiques sur le colza (2006-2014)



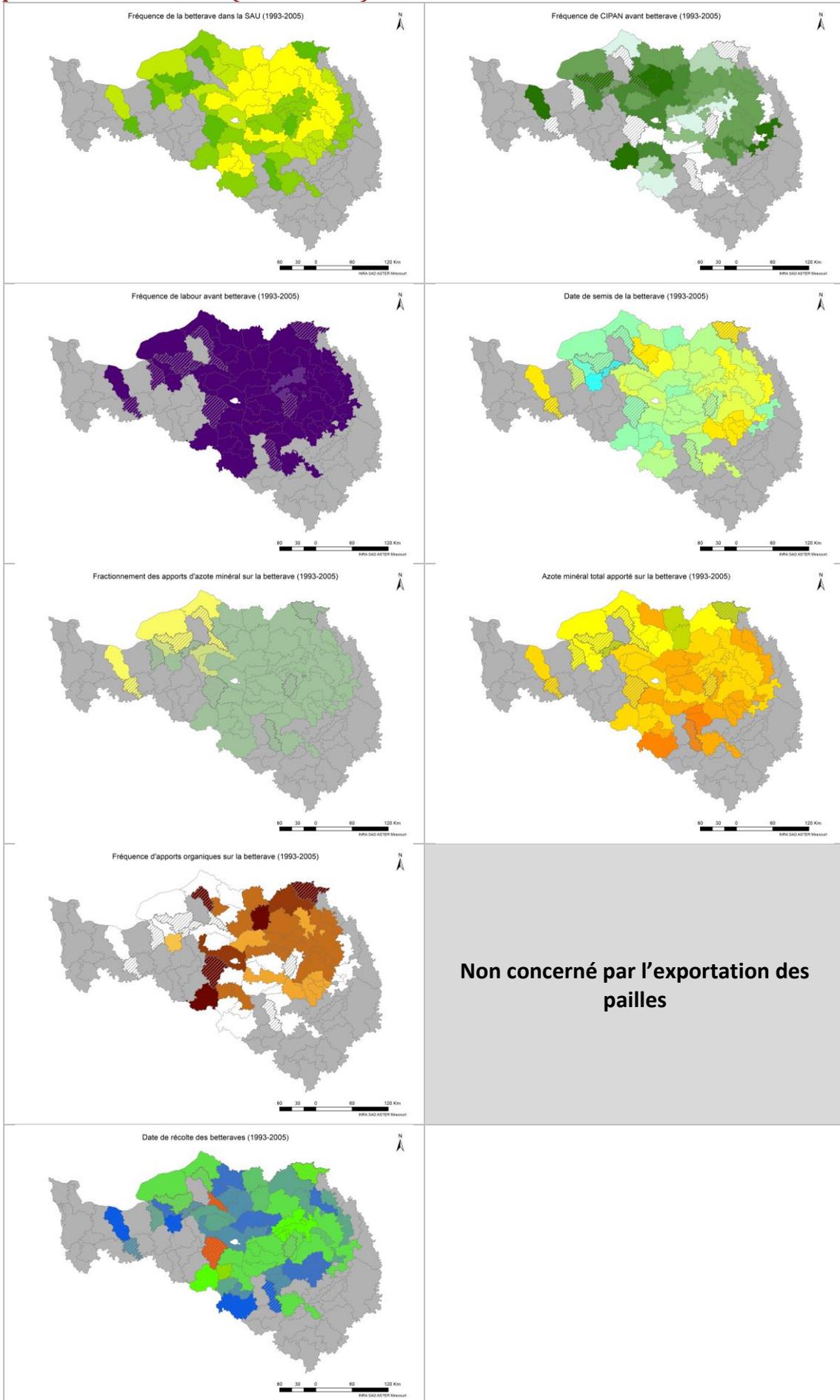
Pratiques sur la betterave (1970-1980)



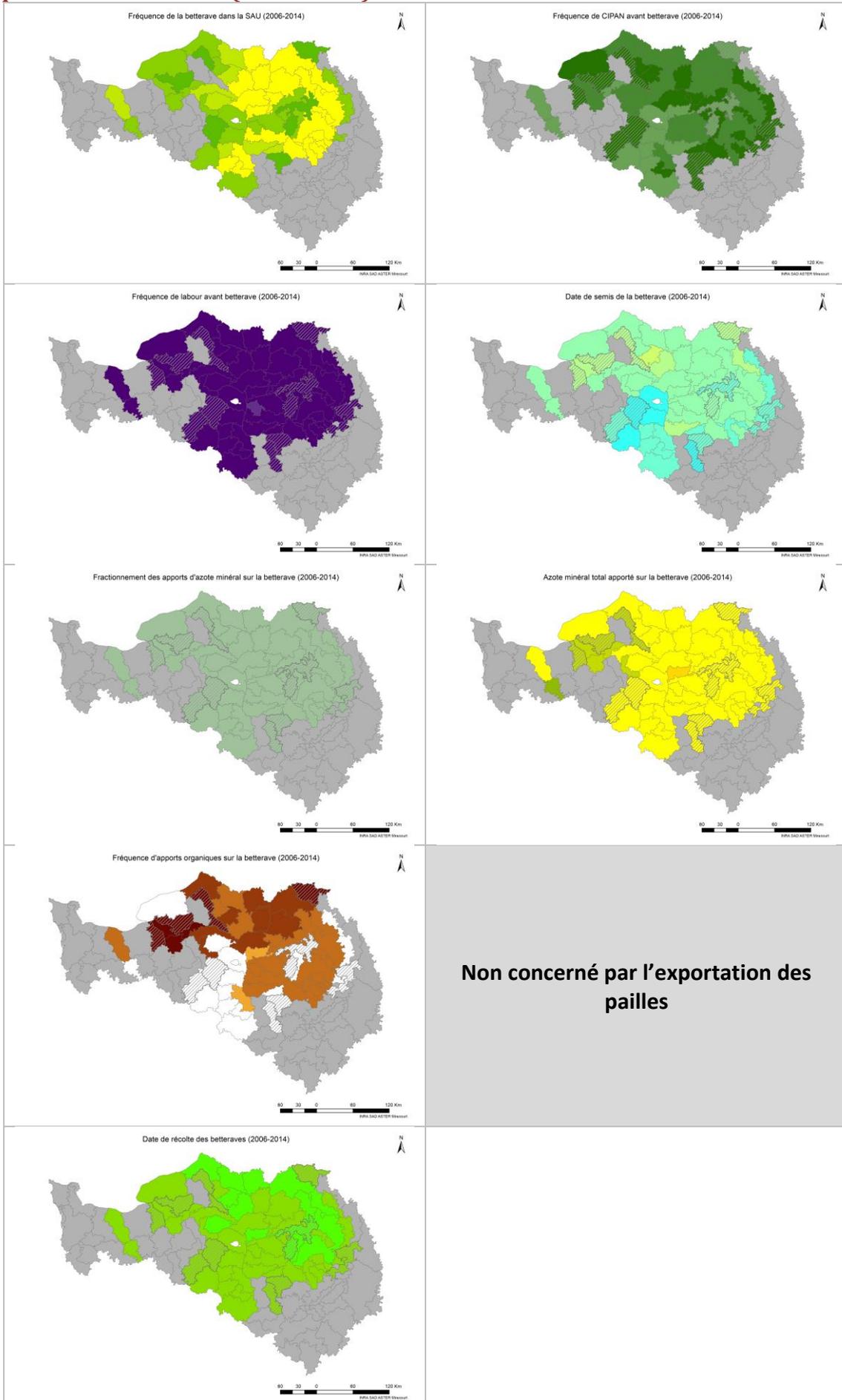
Pratiques sur la betterave (1981-1992)



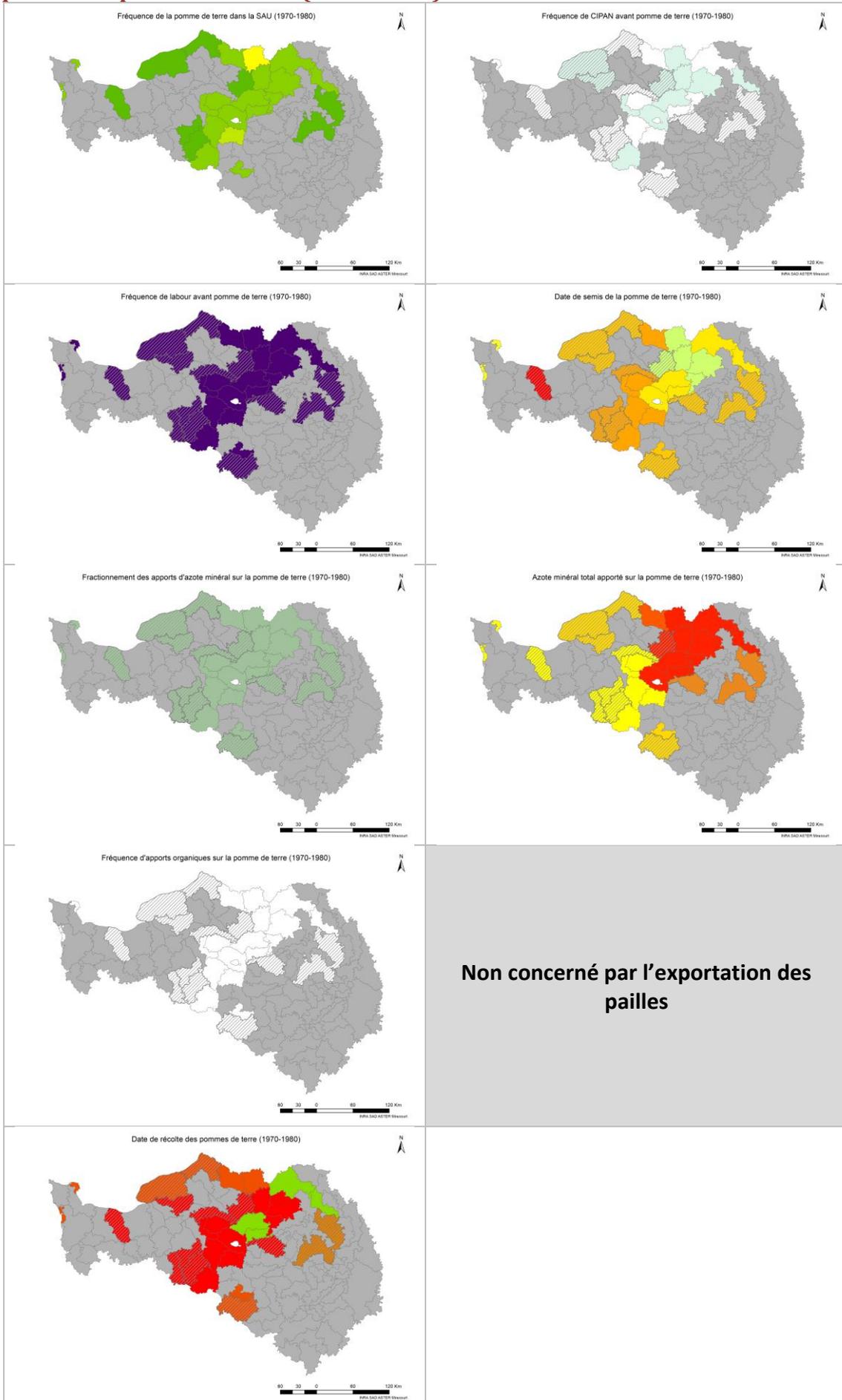
Pratiques sur la betterave (1993-2005)



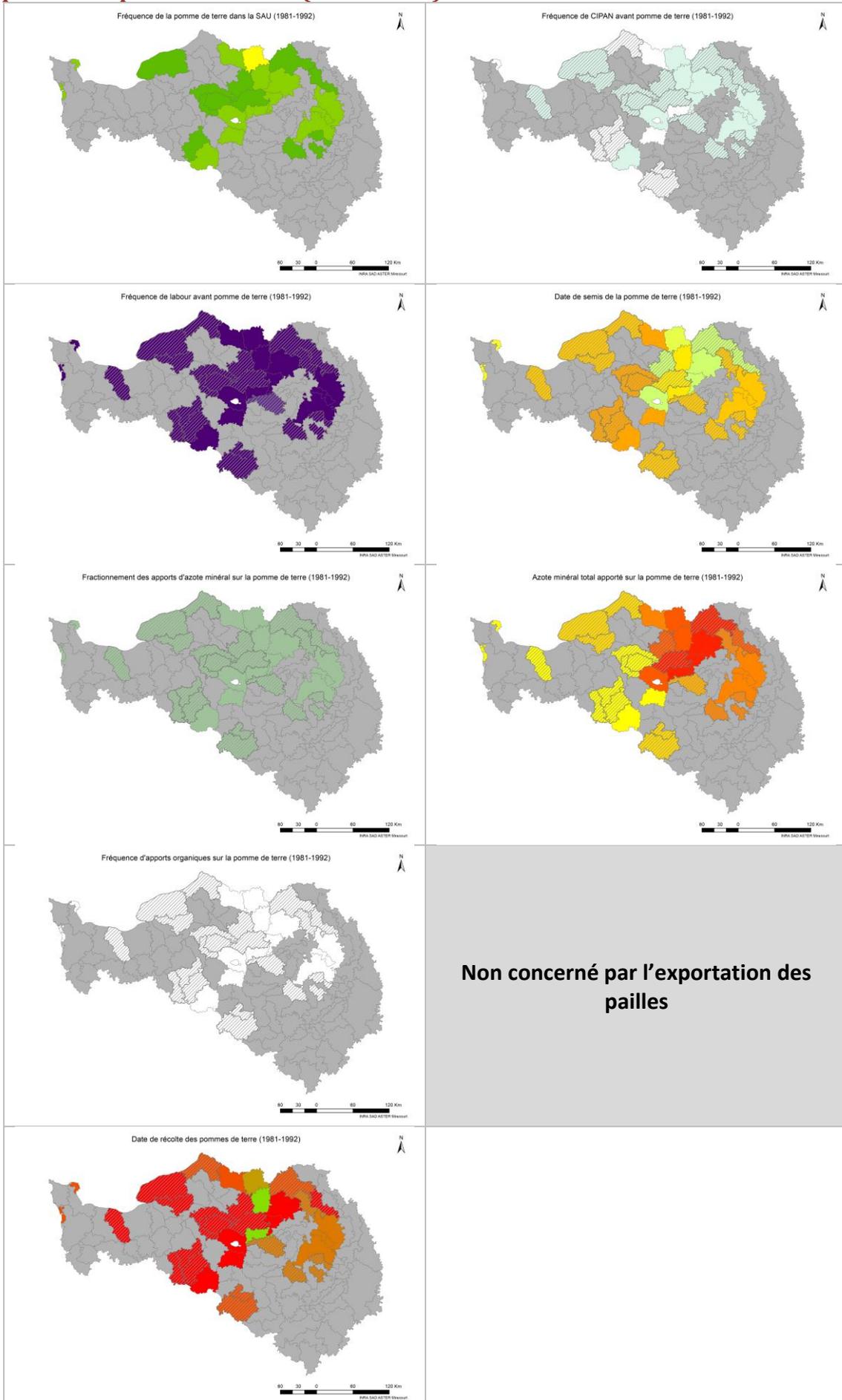
Pratiques sur la betterave (2006-2014)



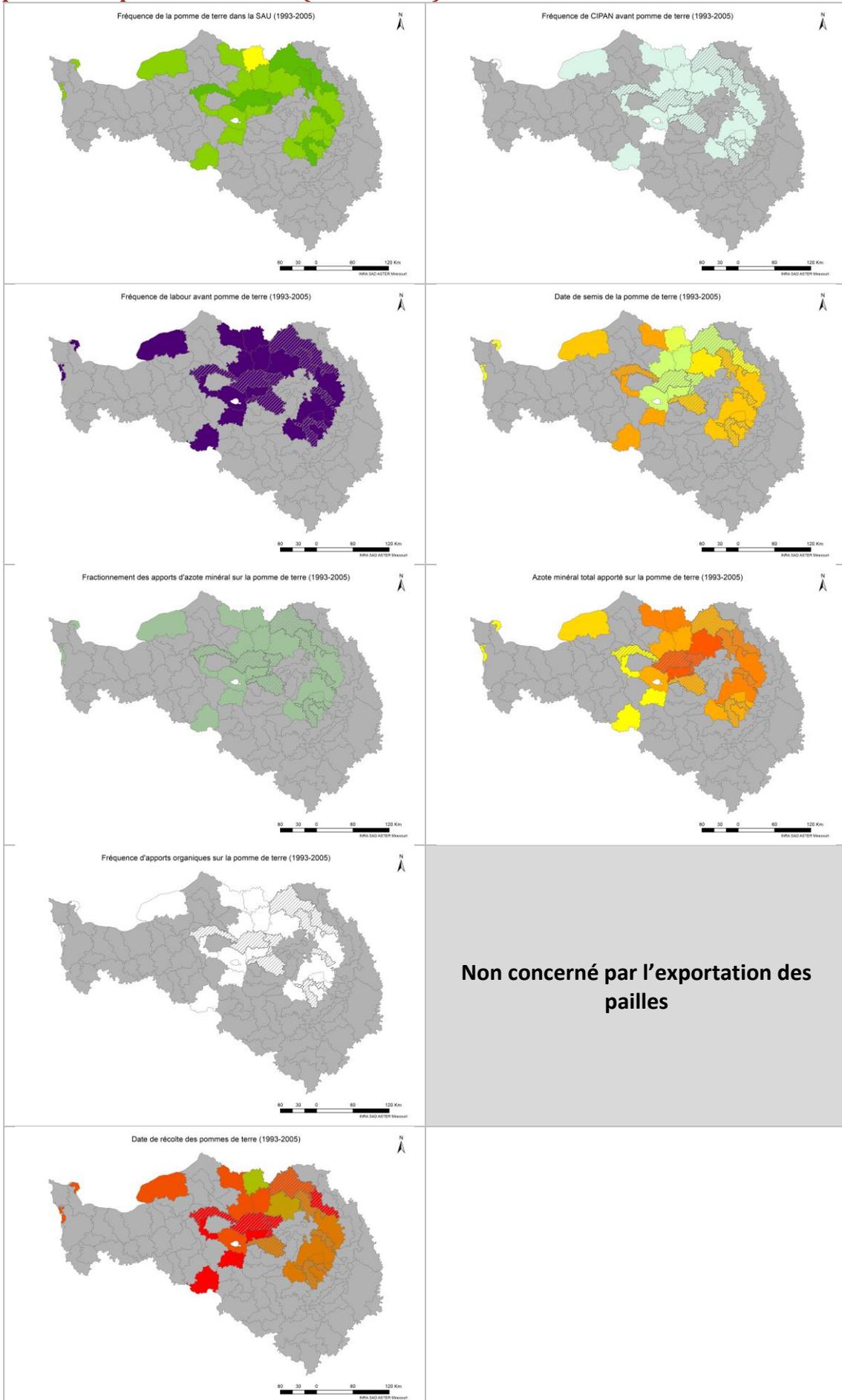
Pratiques sur la pomme de terre (1970-1980)



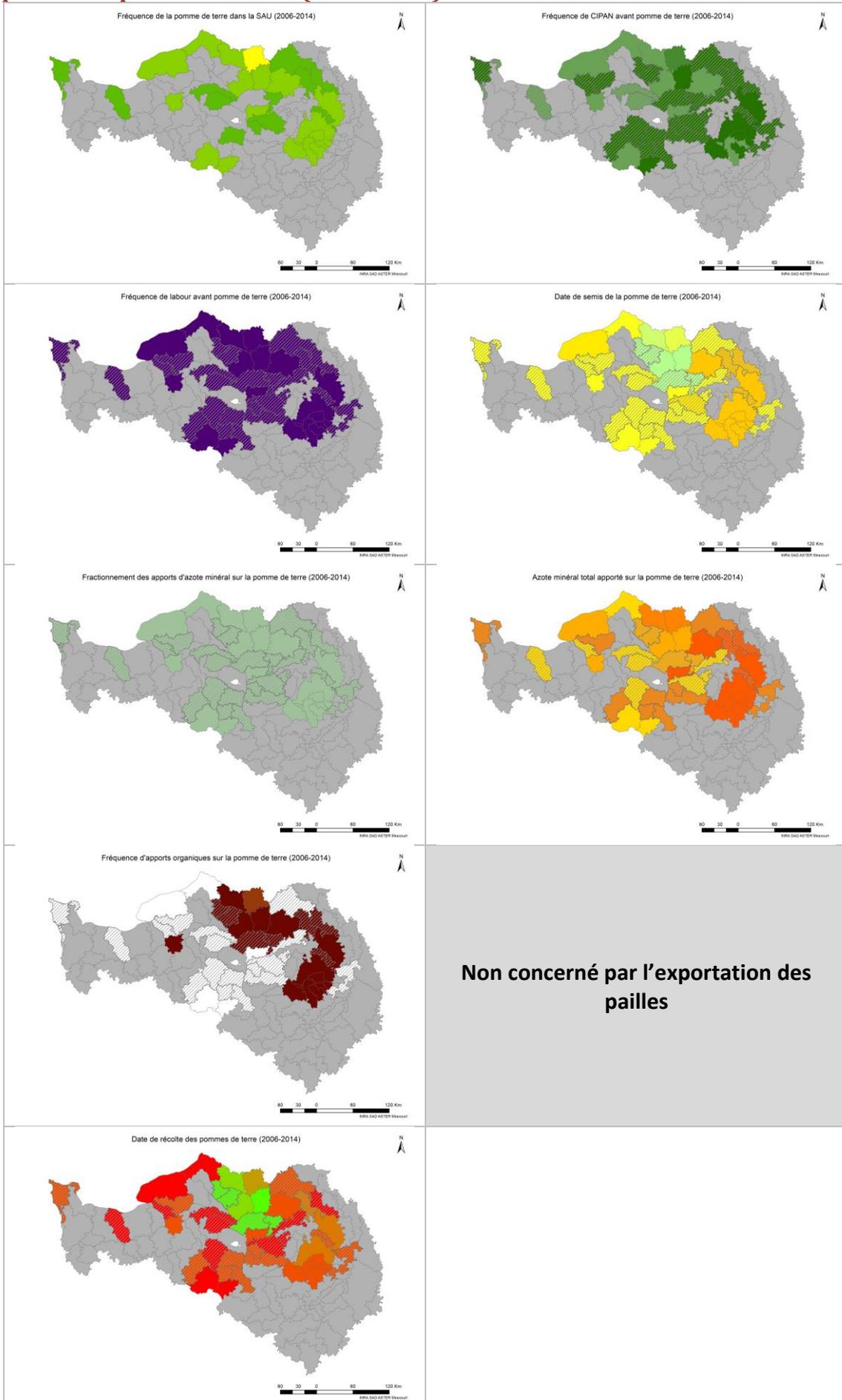
Pratiques sur la pomme de terre (1981-1992)



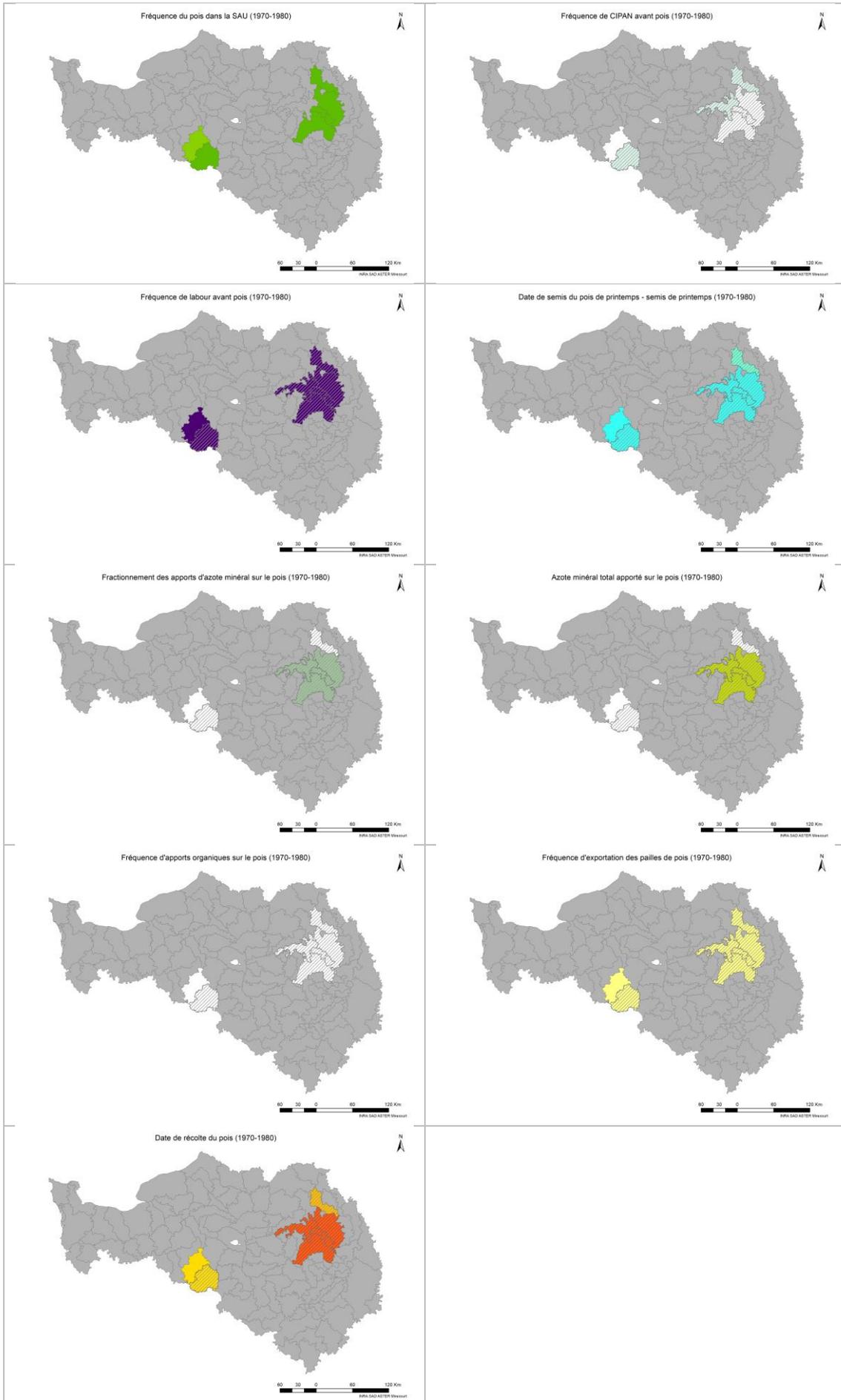
Pratiques sur la pomme de terre (1993-2005)



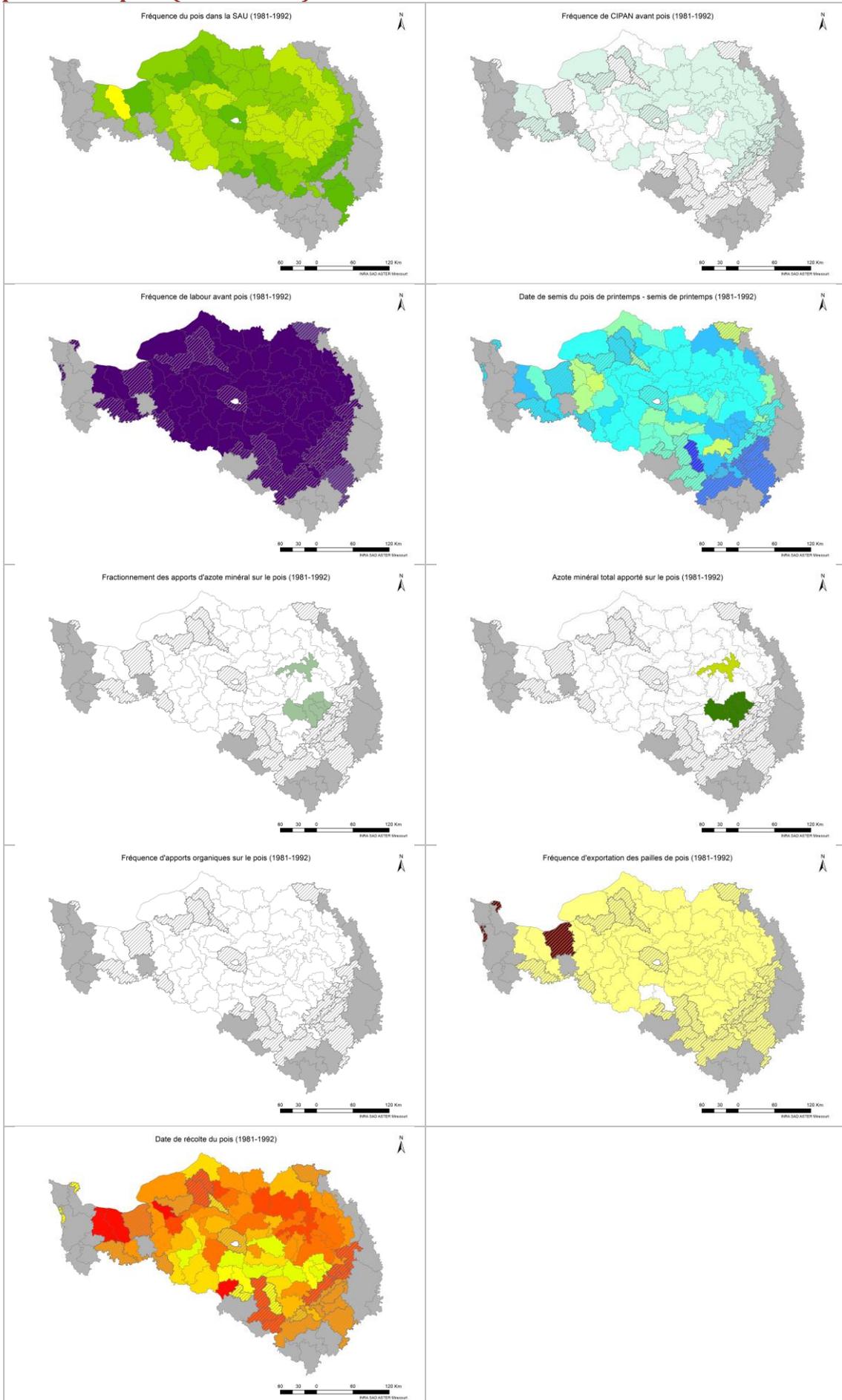
Pratiques sur la pomme de terre (2006-2014)



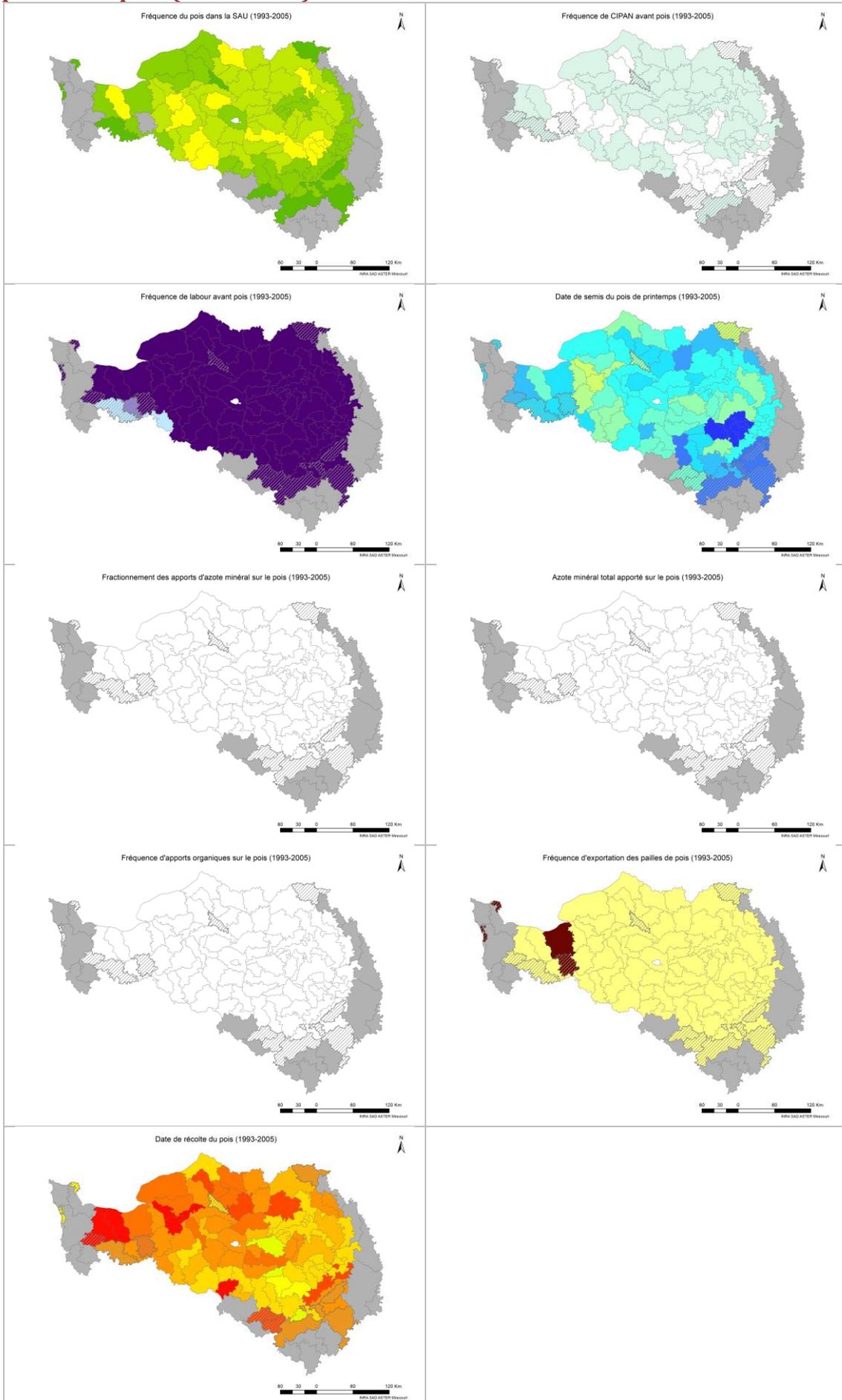
Pratiques sur le pois (1970-1980)



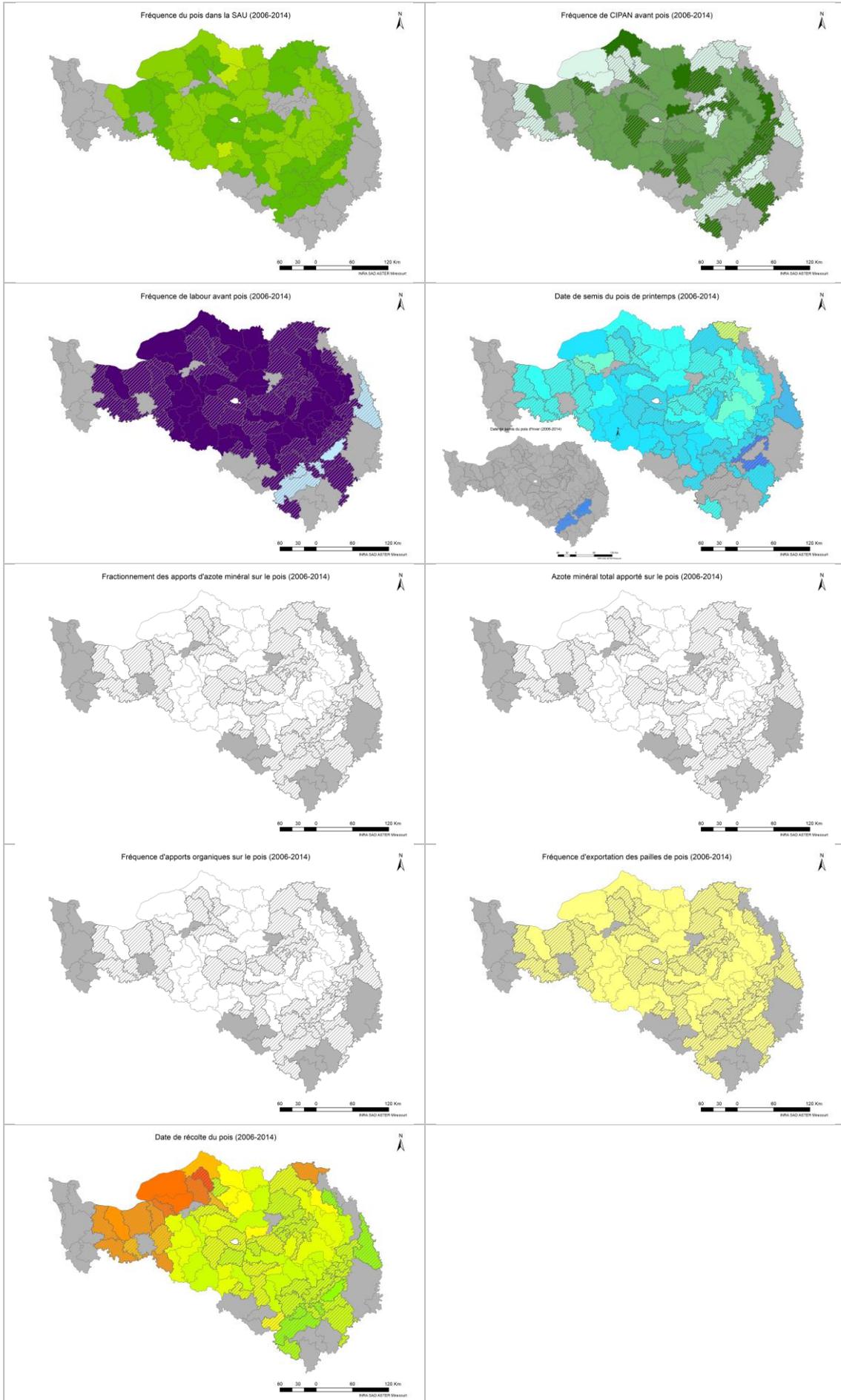
Pratiques sur le pois (1981-1992)



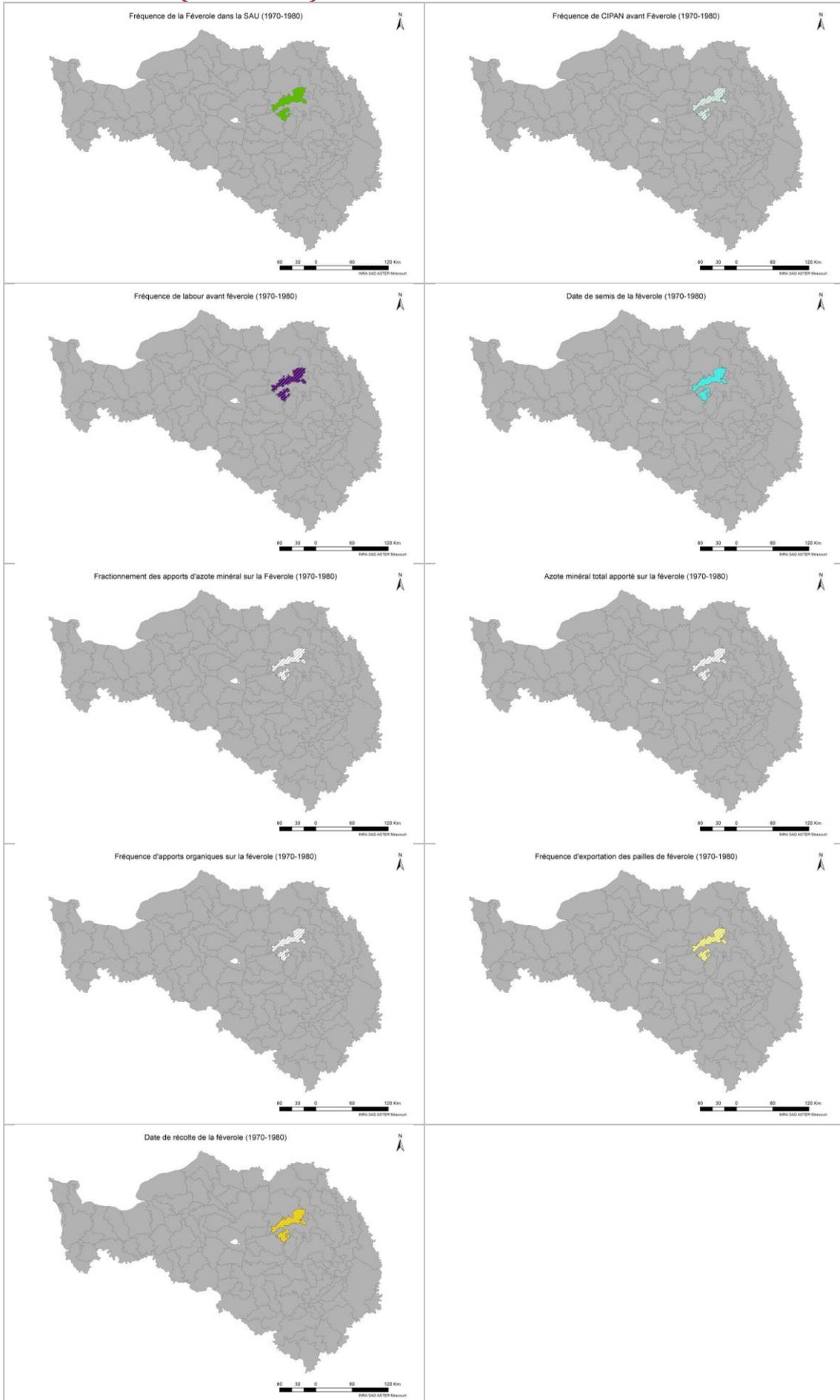
Pratiques sur le pois (1993-2005)



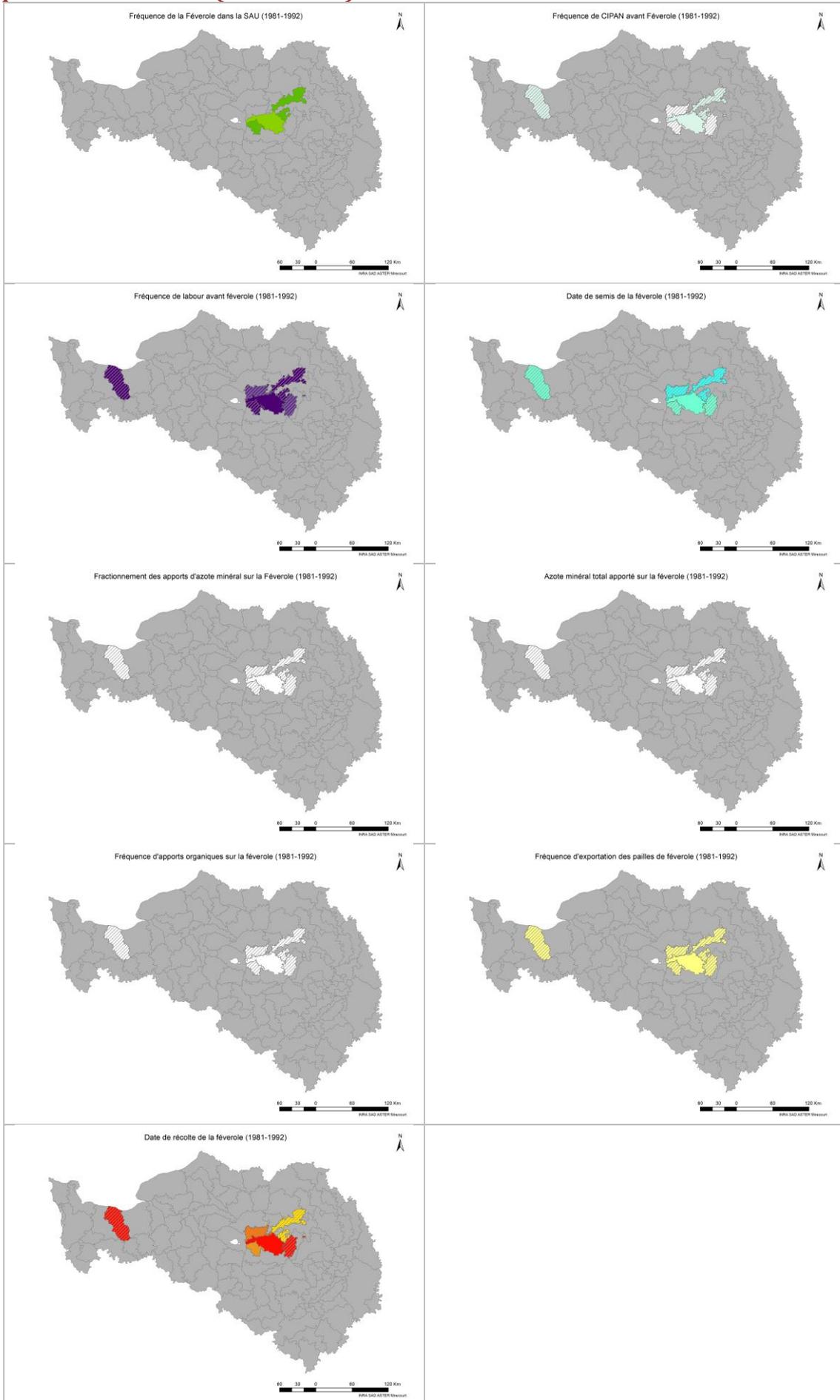
Pratiques sur le pois (2006-2013)



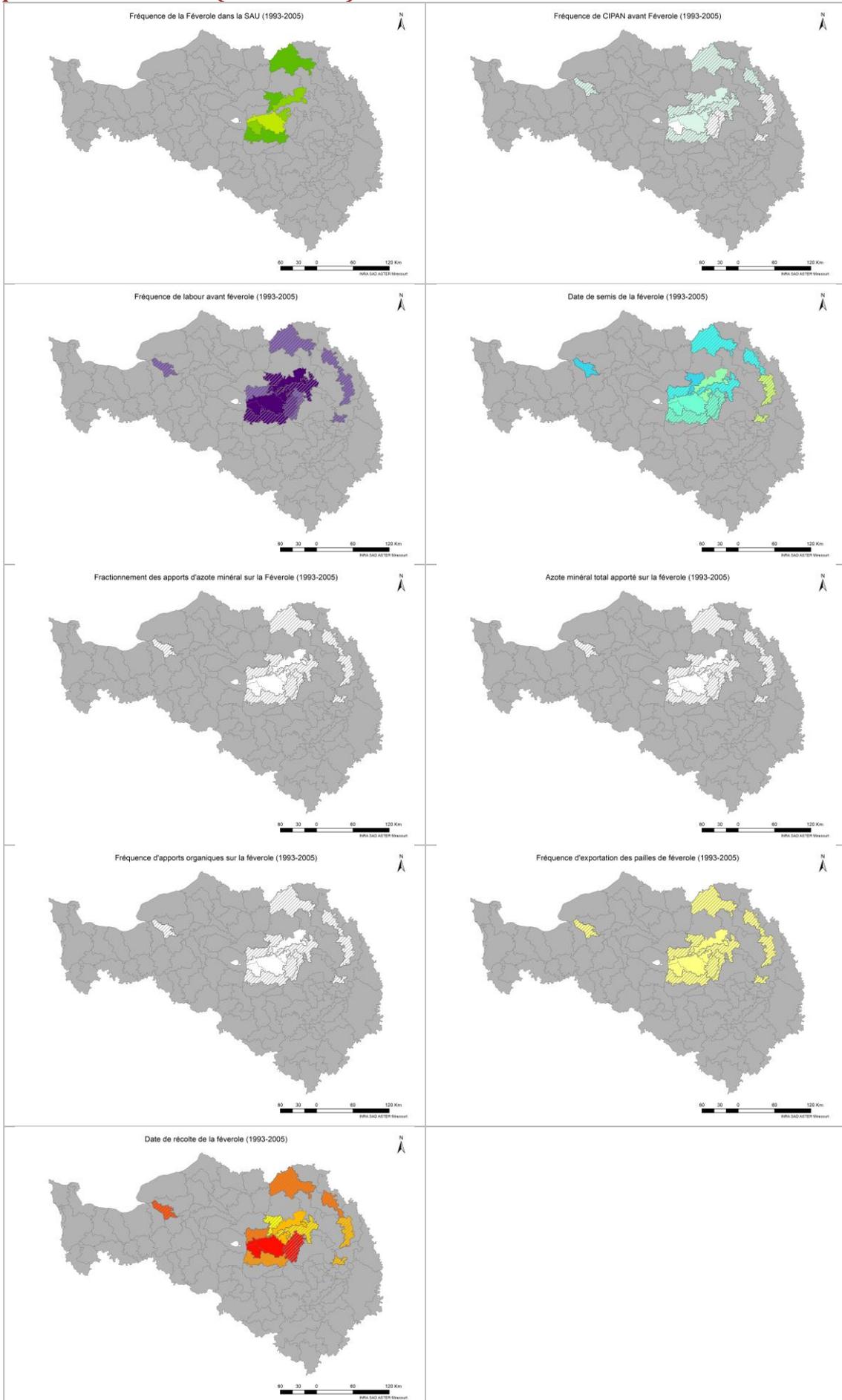
Pratiques sur la féverole (1970-1980)



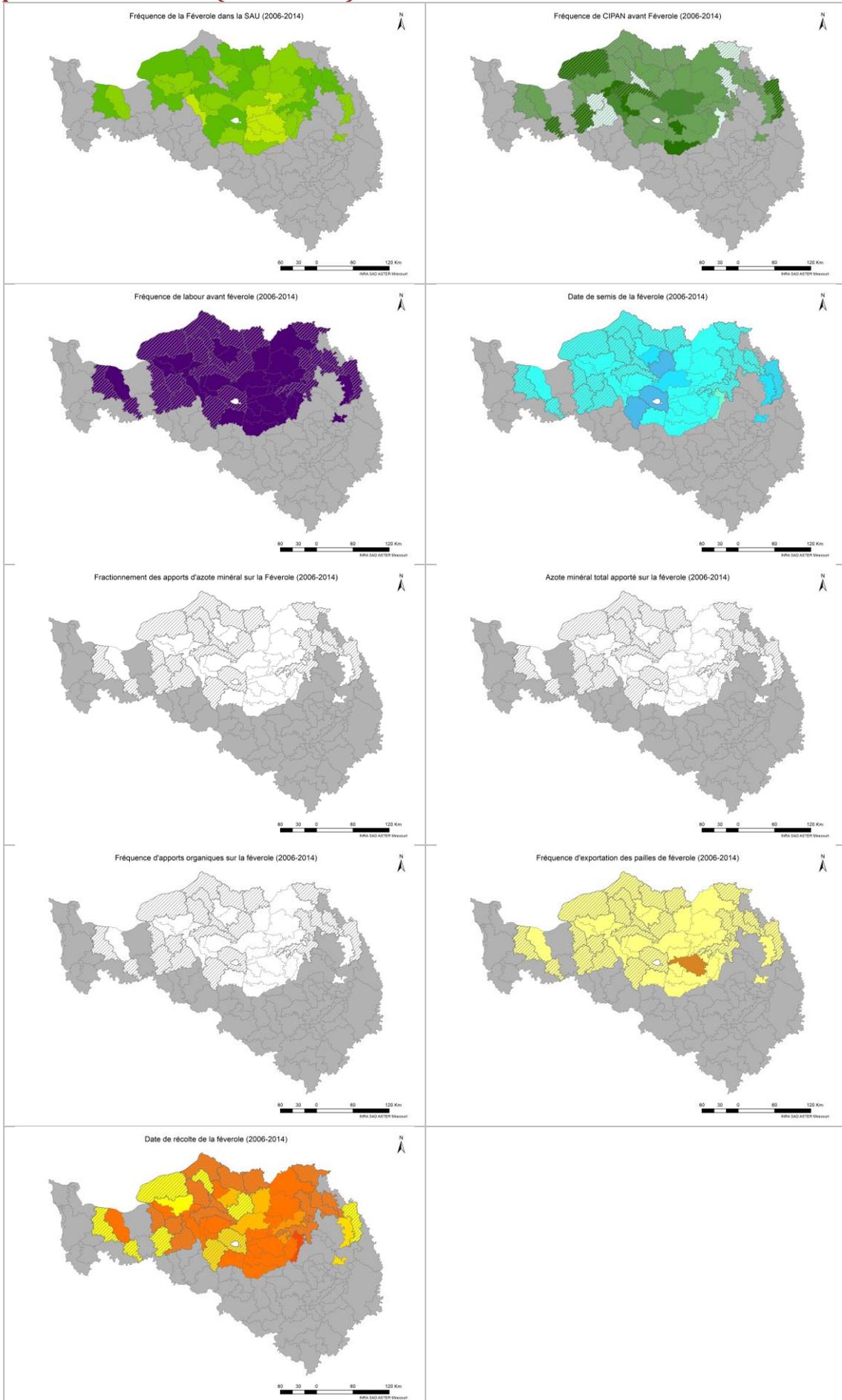
Pratiques sur la féverole (1981-1992)



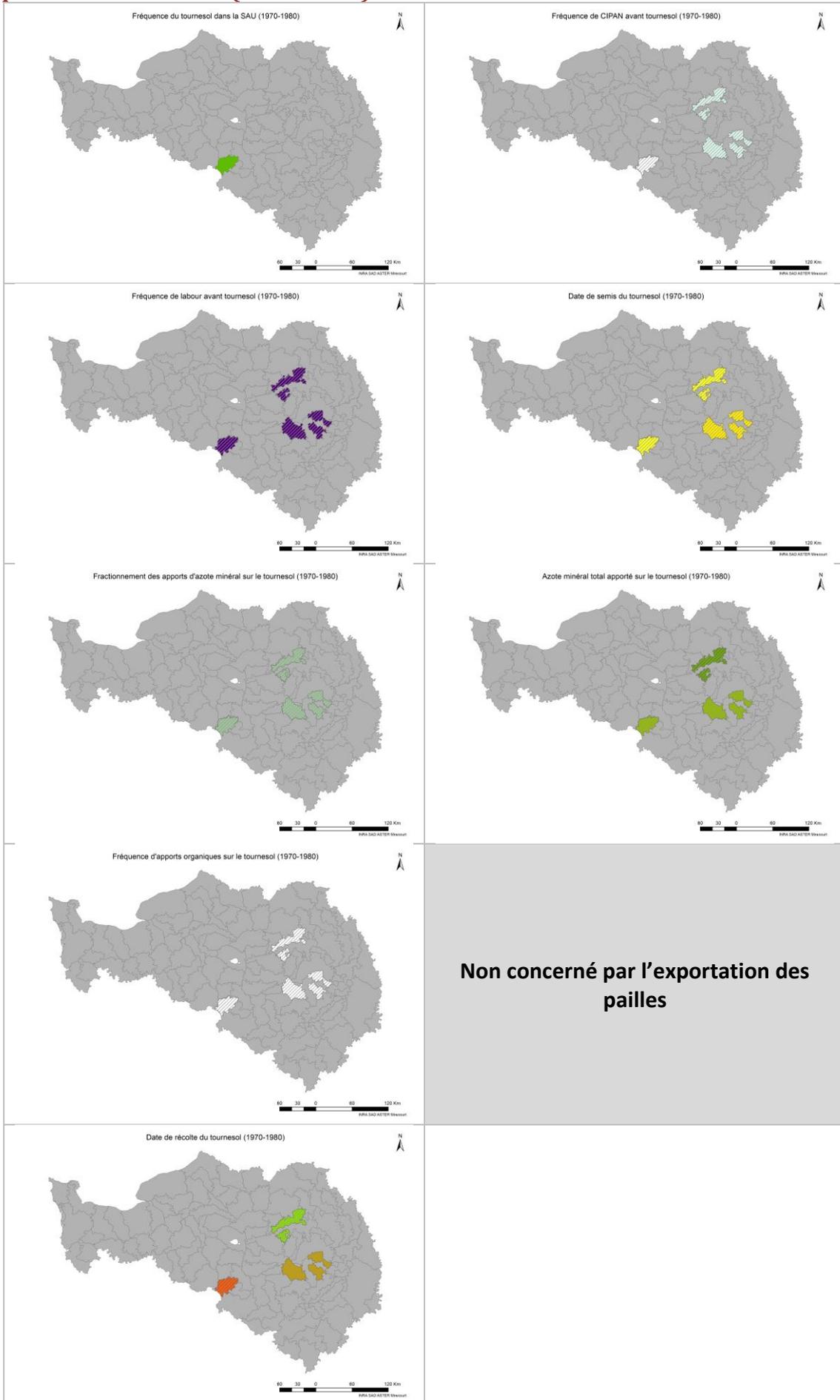
Pratiques sur la féverole (1993-2005)



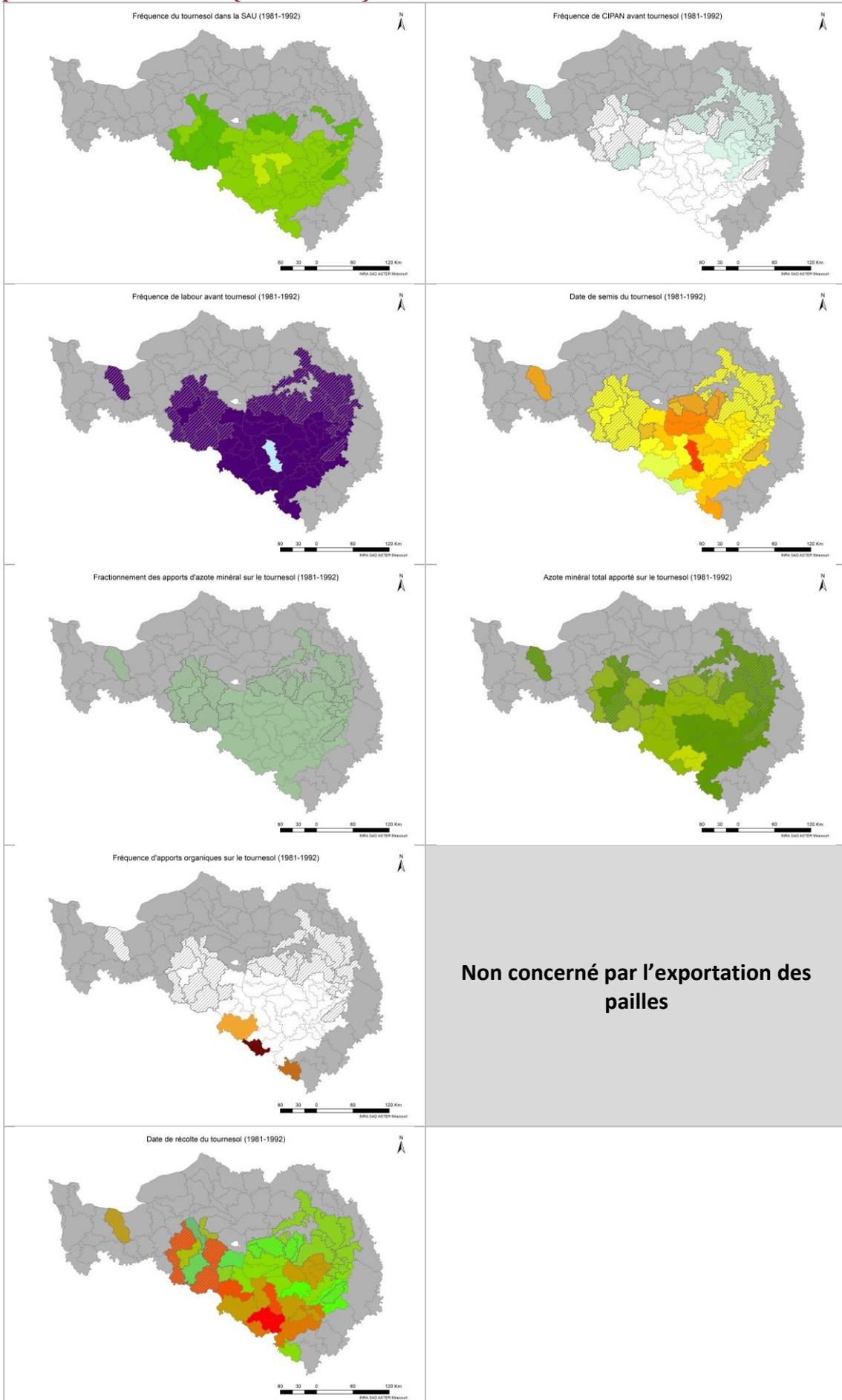
Pratiques sur la féverole (2006-2014)



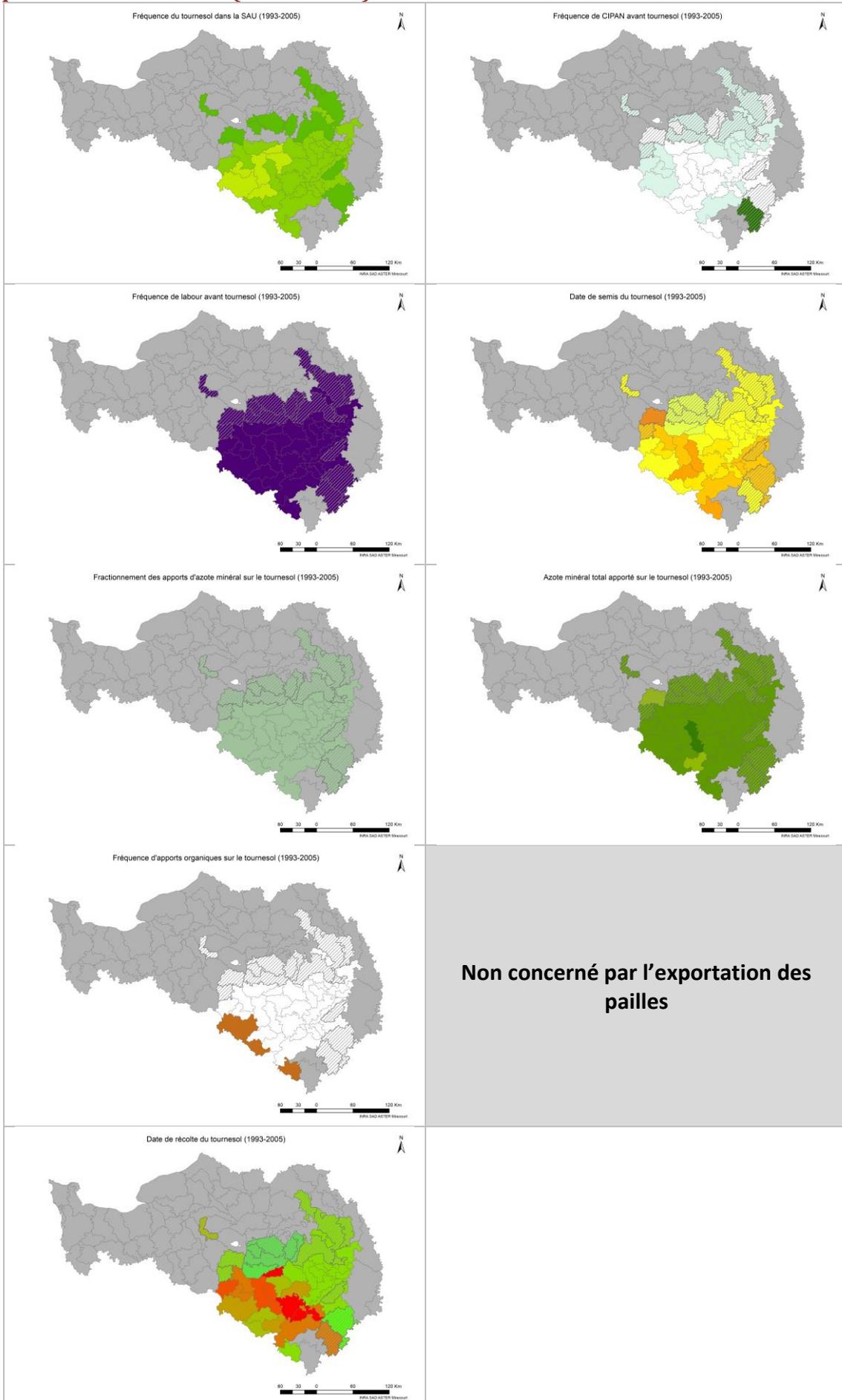
Pratiques sur le tournesol (1970-1980)



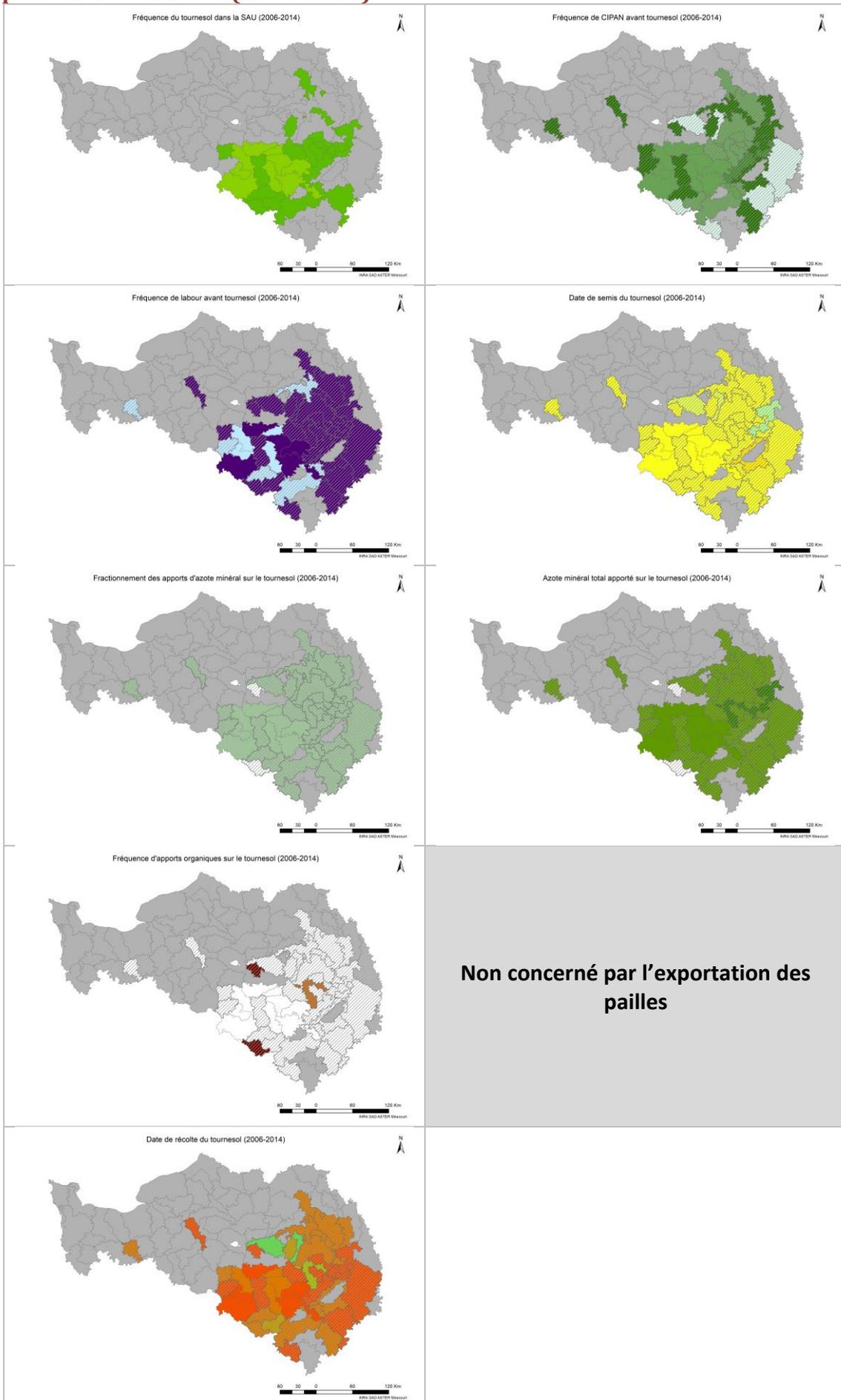
Pratiques sur le tournesol (1981-1992)



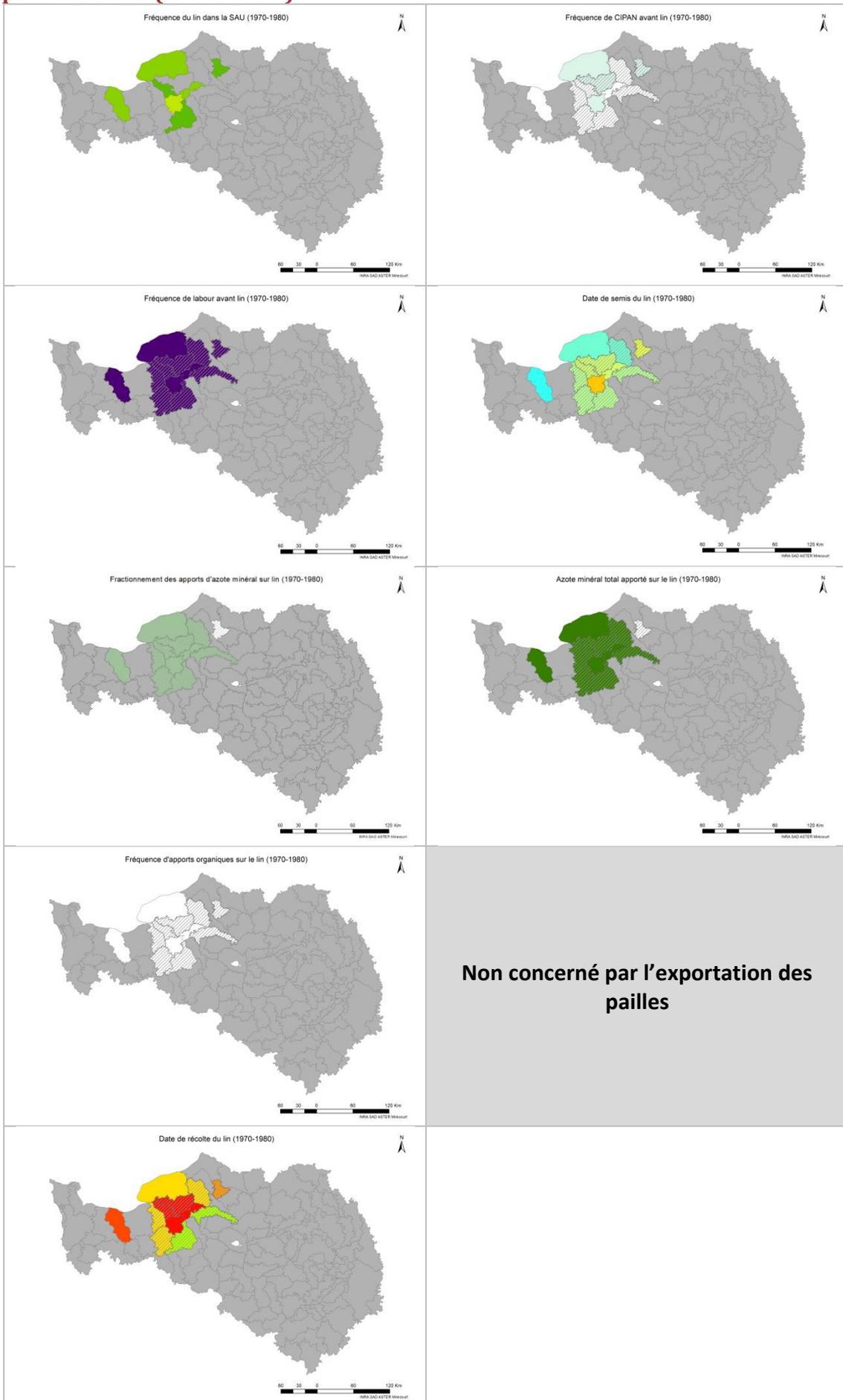
Pratiques sur le tournesol (1993-2005)



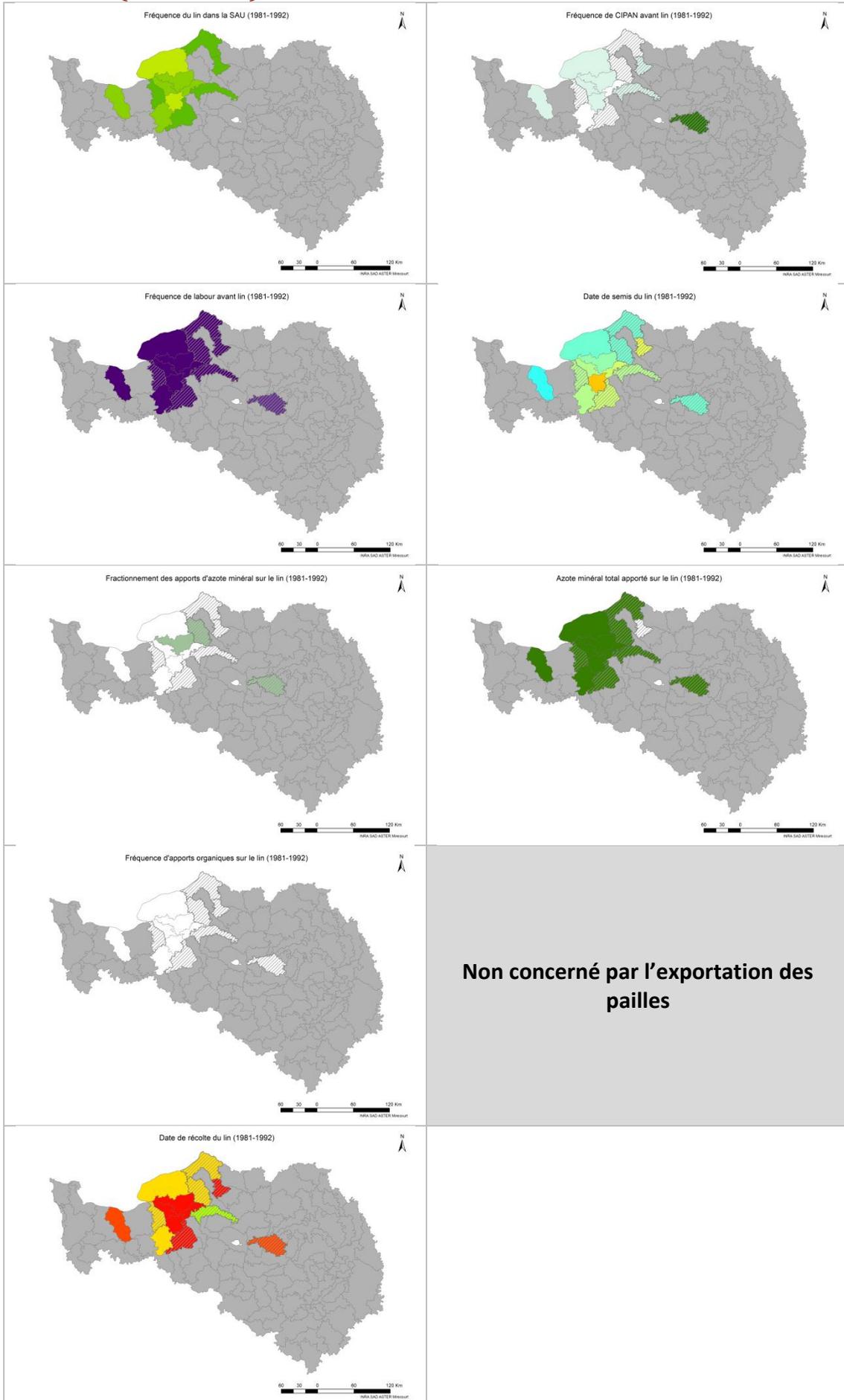
Pratiques sur le tournesol (2006-2014)



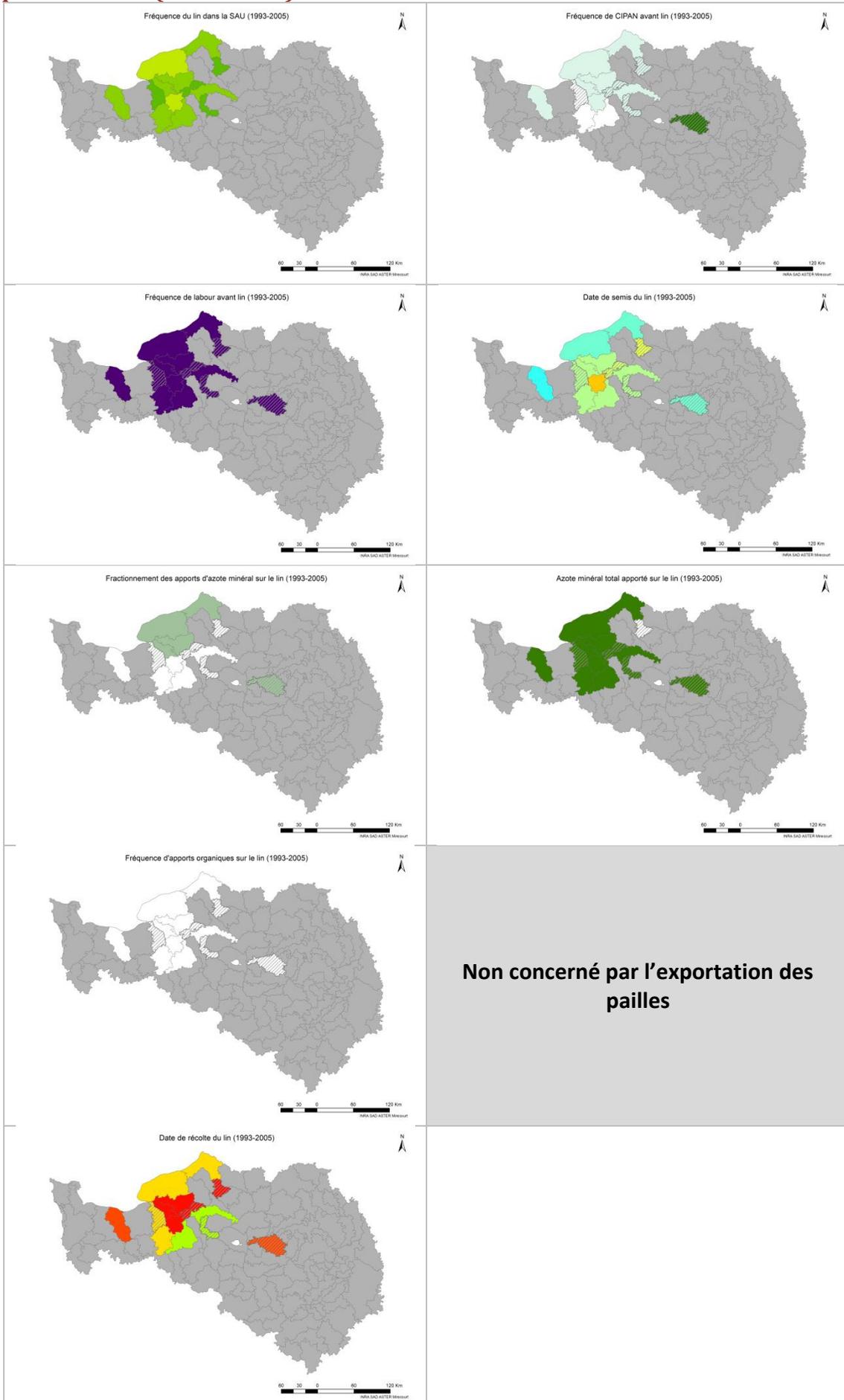
Pratiques sur le lin (1970-1980)



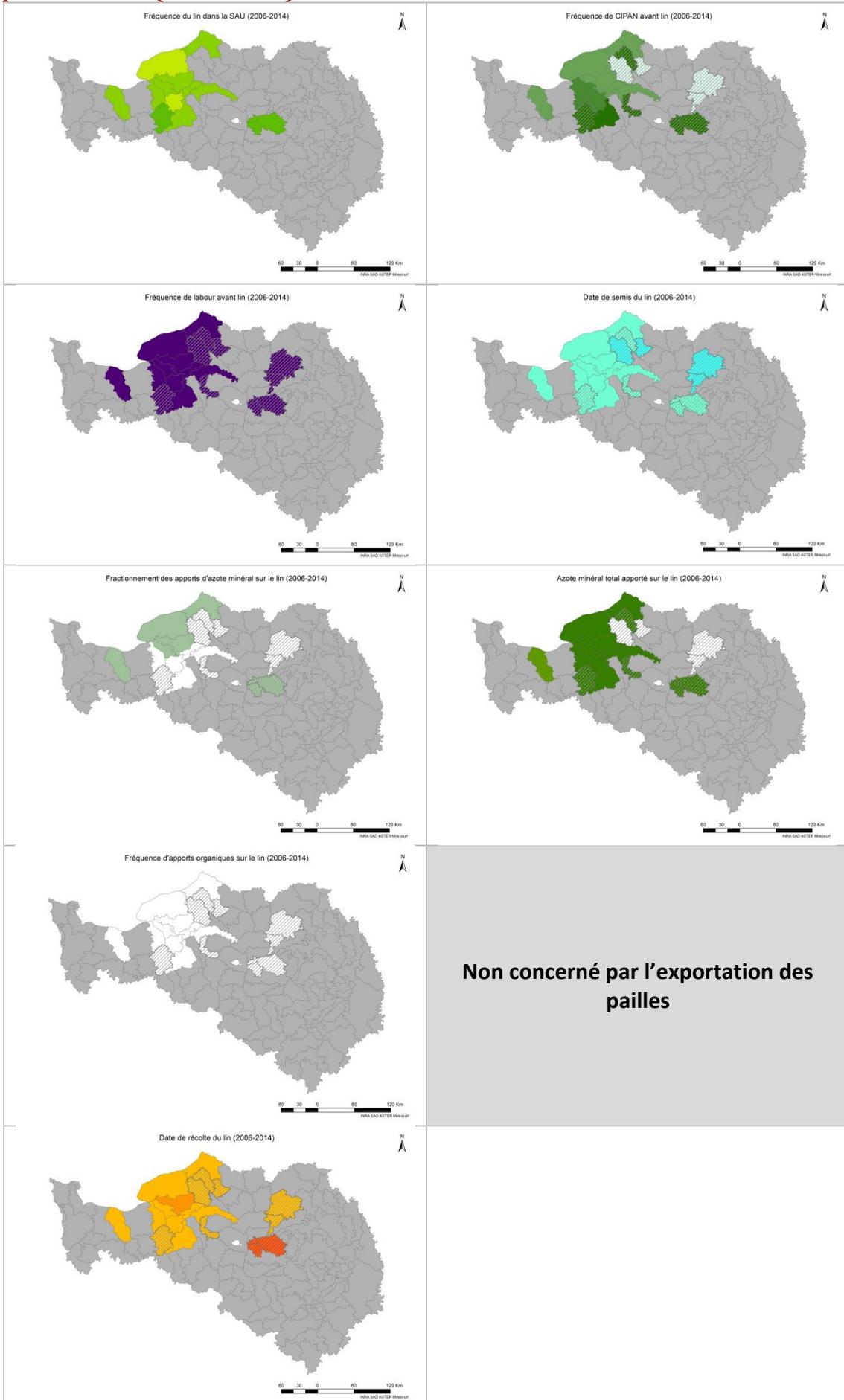
Pratiques sur le lin (1981-1992)



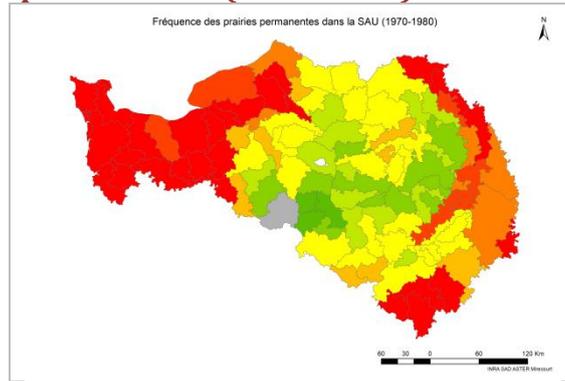
Pratiques sur le lin (1993-2005)



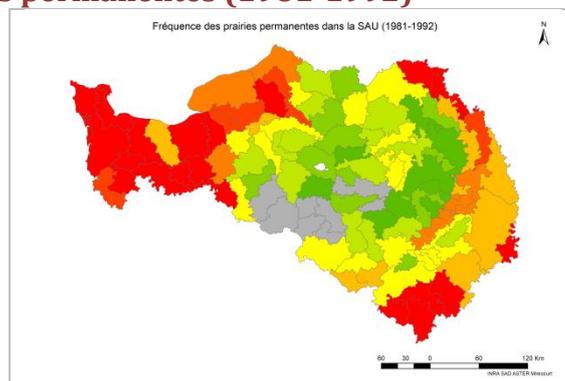
Pratiques sur le lin (2006-2014)



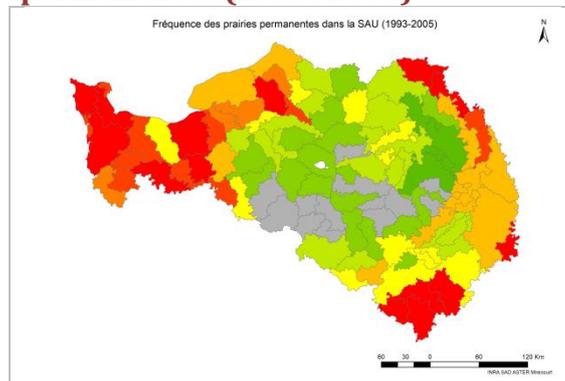
Pratiques sur les prairies permanentes (1970-1980)



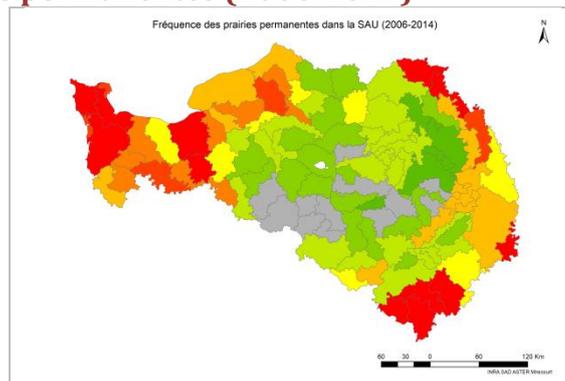
Pratiques sur les prairies permanentes (1981-1992)



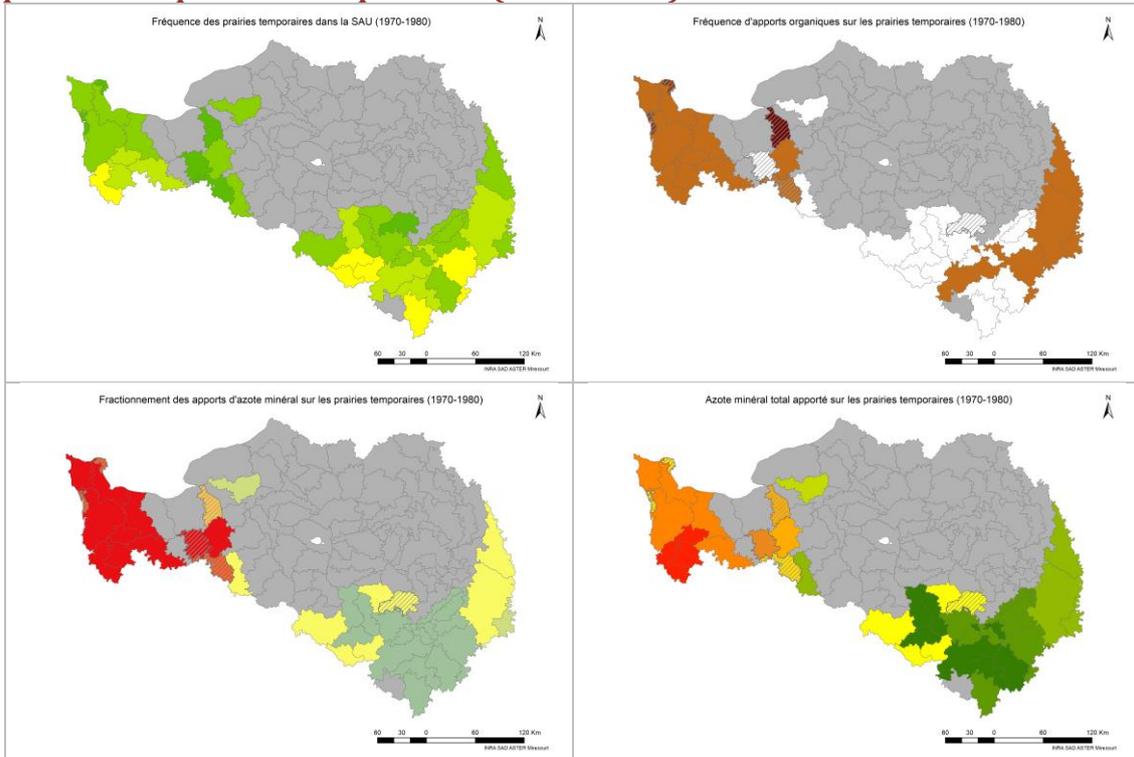
Pratiques sur les prairies permanentes (1993-2005)



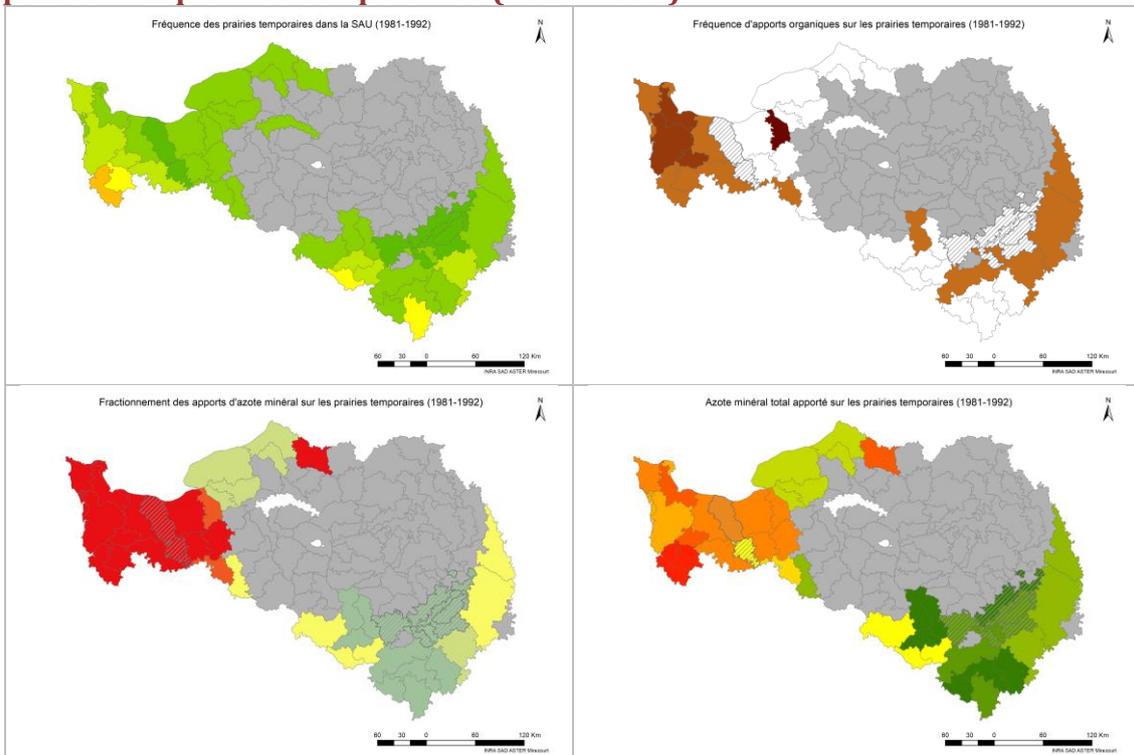
Pratiques sur les prairies permanentes (2006-2014)



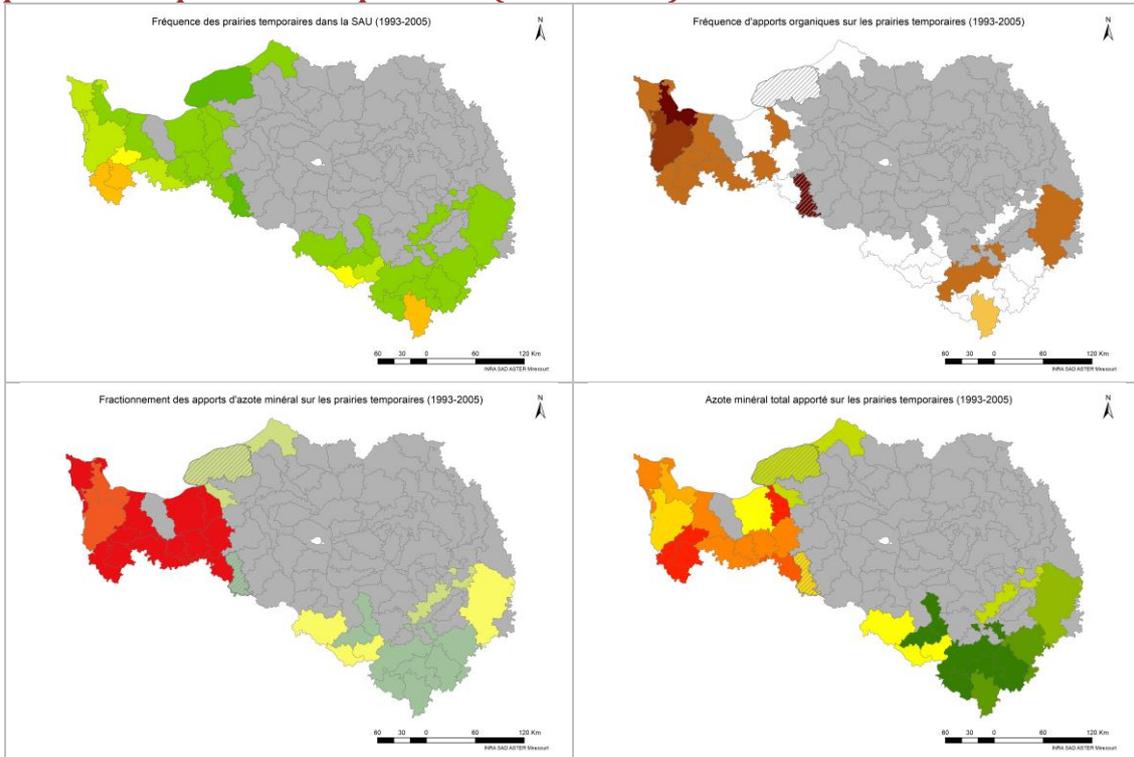
Pratiques sur les prairies temporaires (1970-1980)



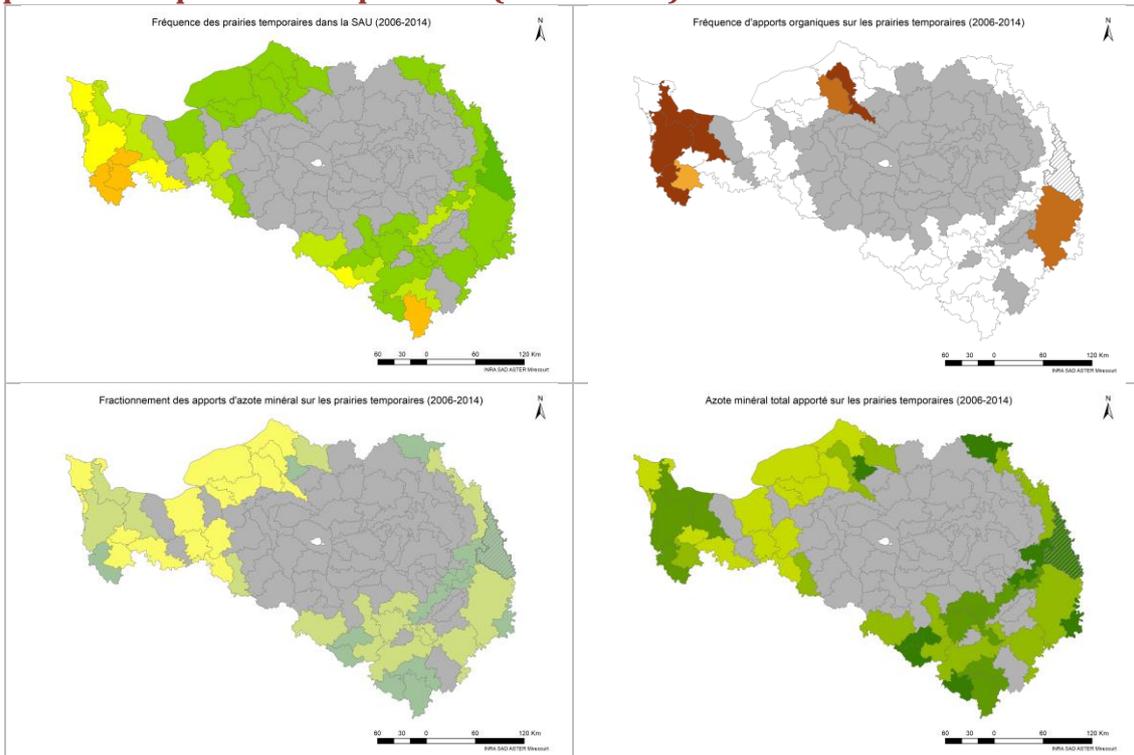
Pratiques sur les prairies temporaires (1981-1992)



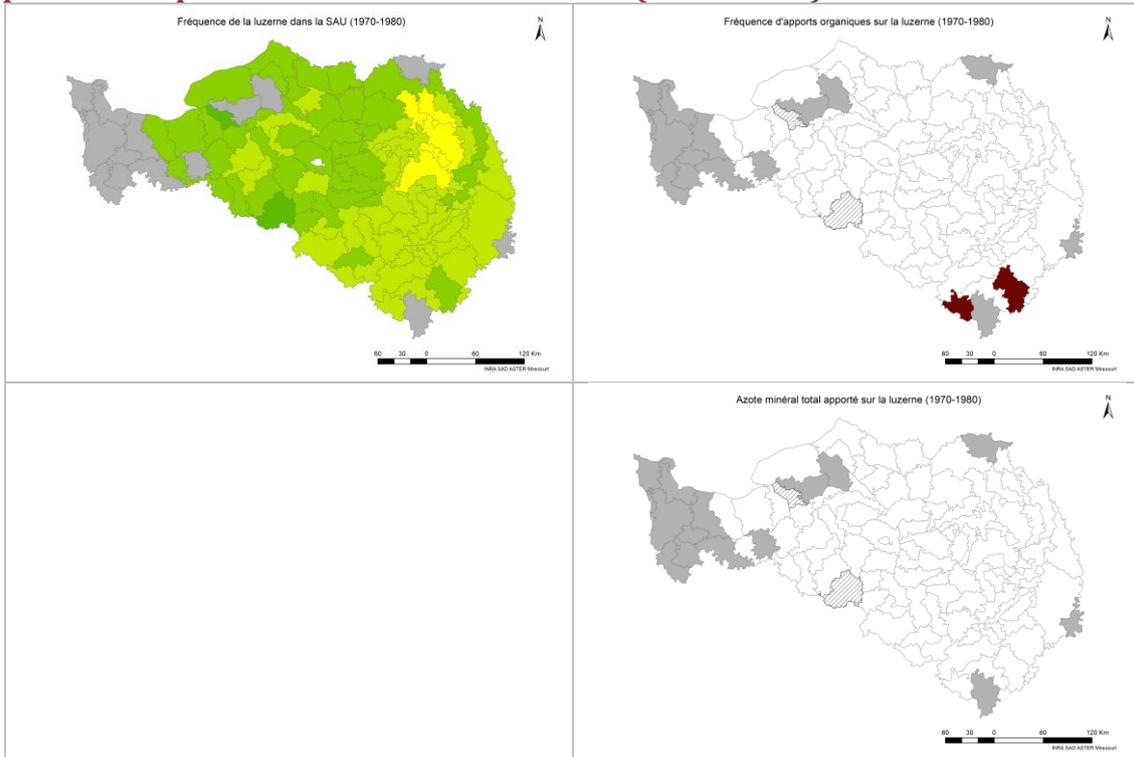
Pratiques sur les prairies temporaires (1993-2005)



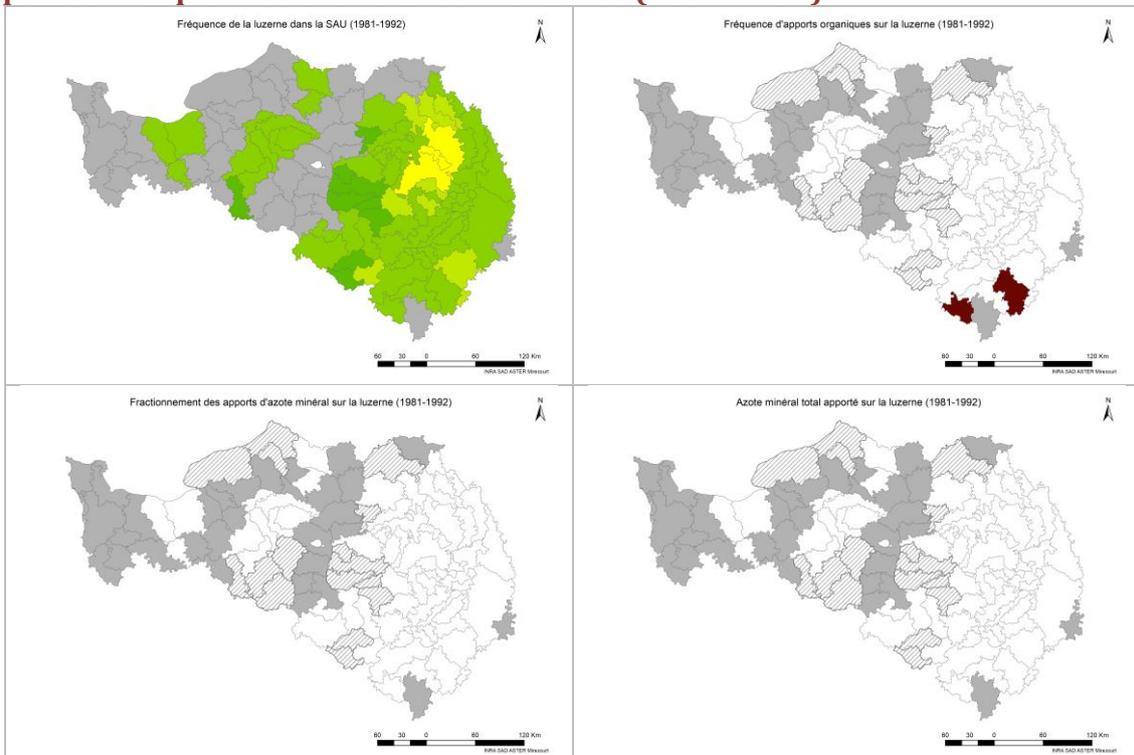
Pratiques sur les prairies temporaires (2006-2014)



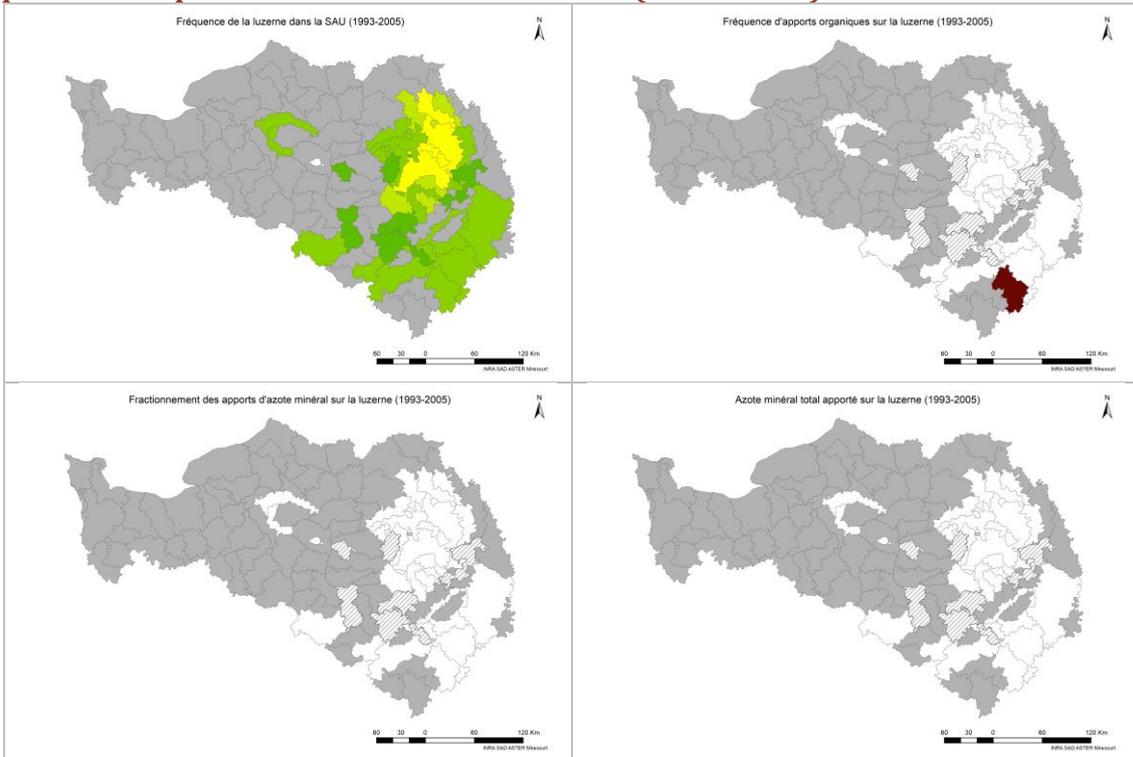
Pratiques sur les prairies artificielles – luzernes (1970-1980)



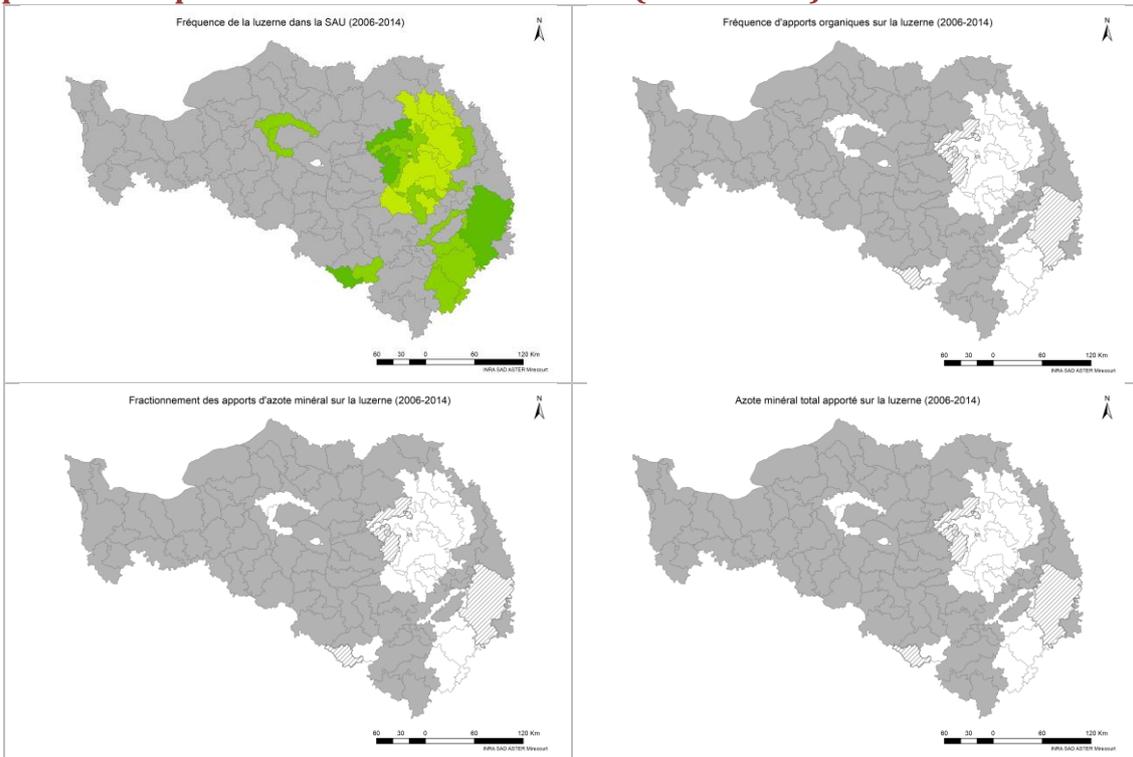
Pratiques sur les prairies artificielles – luzernes (1981-1992)



Pratiques sur les prairies artificielles – luzernes (1993-2005)



Pratiques sur les prairies artificielles – luzernes (2006-2014)



Annexe 3 : Evolution des indicateurs climatiques sur le bassin Seine-Normandie

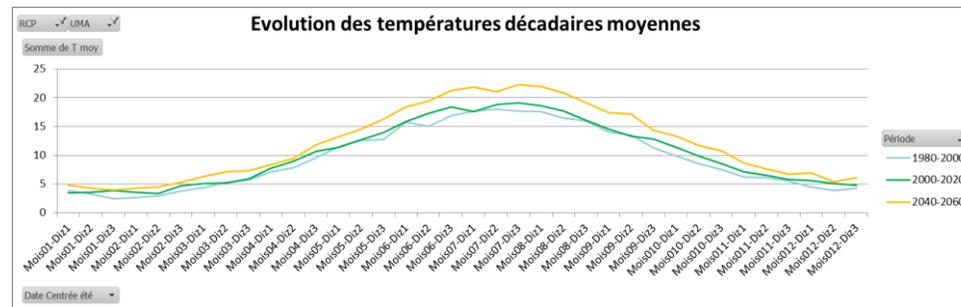
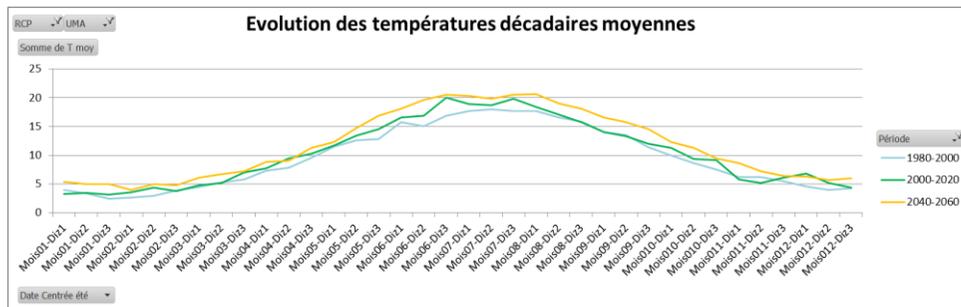
Evolution des températures moyennes

UMA

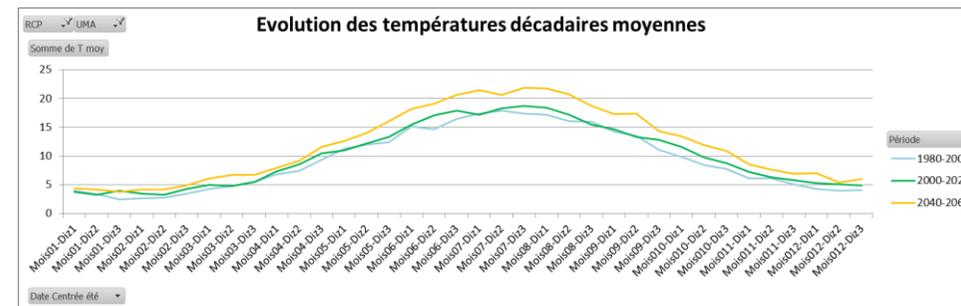
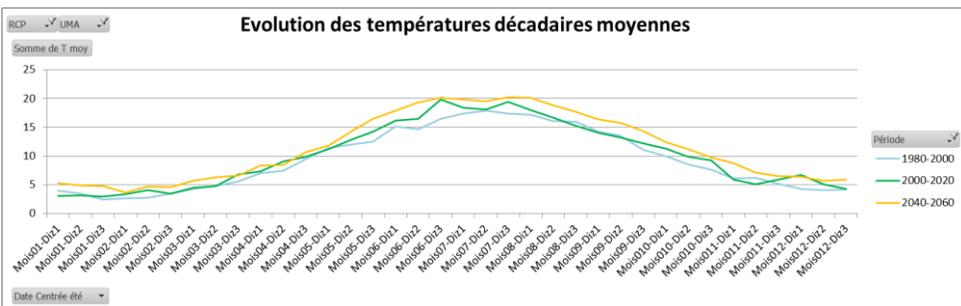
RCP 4.5

RCP 8.5

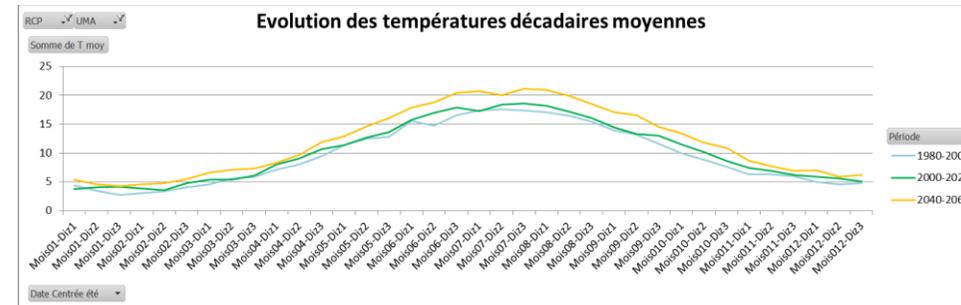
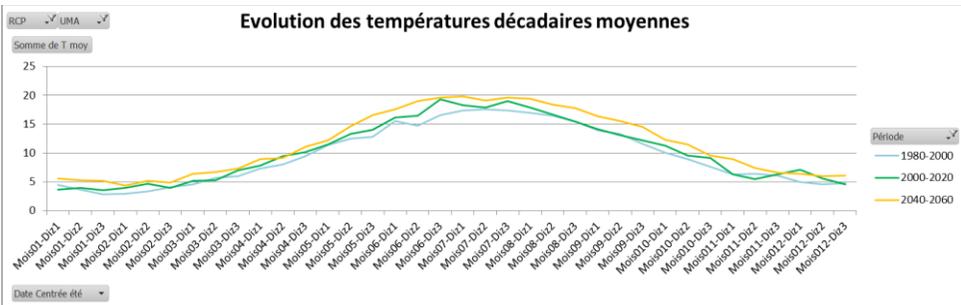
11 : Plateaux de l'Est



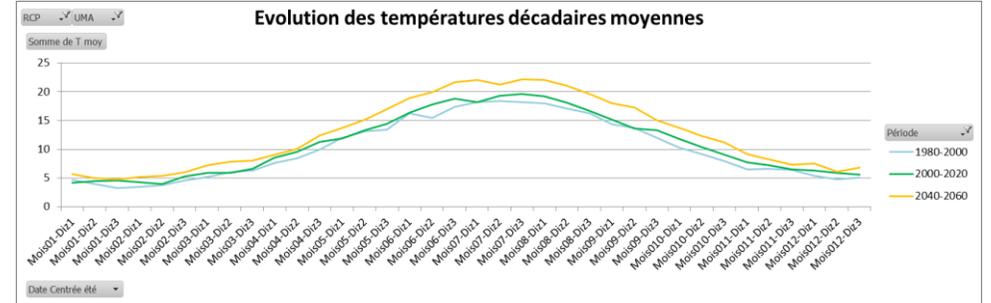
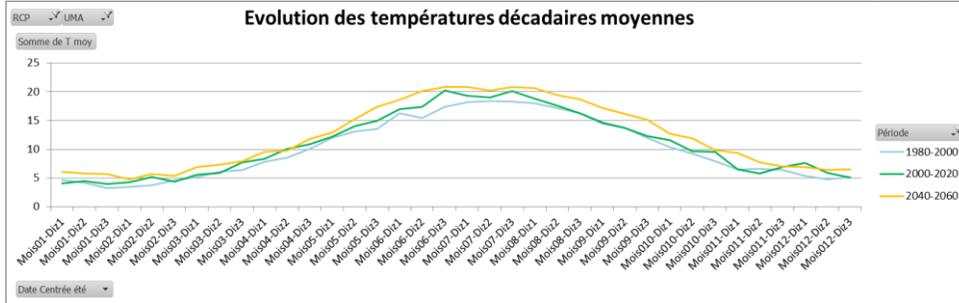
51 : Morvan



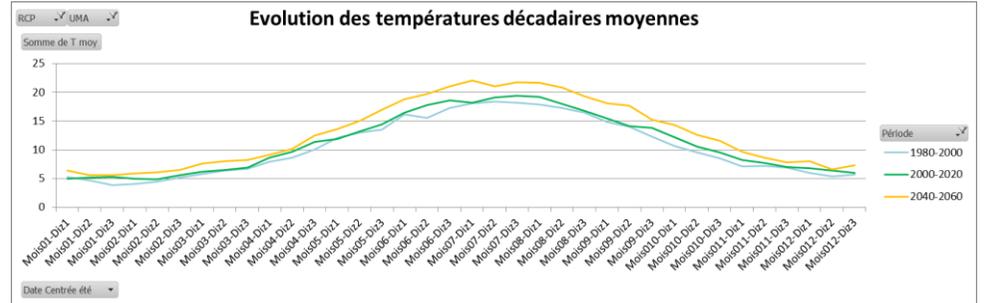
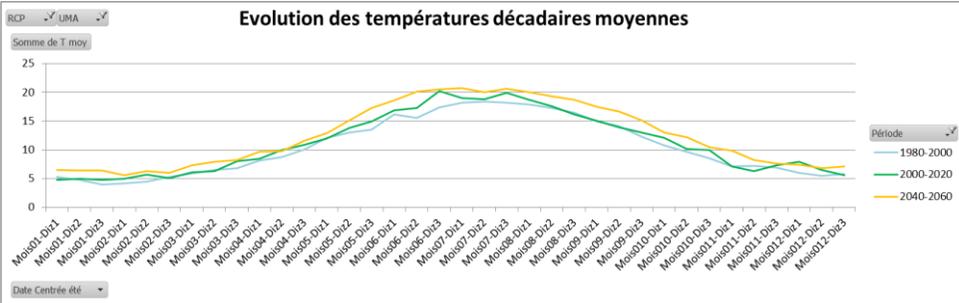
93 : Thiérache



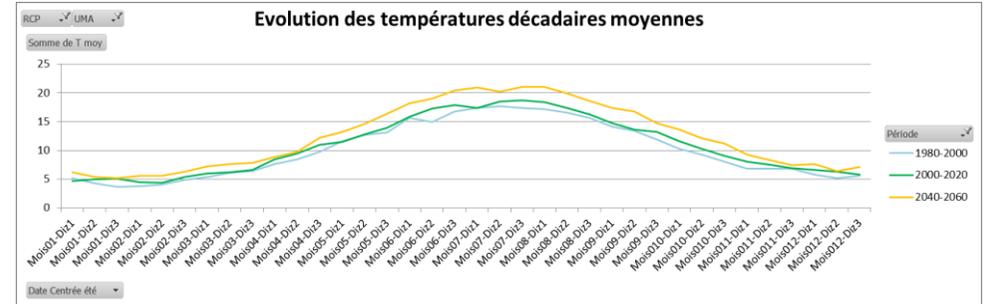
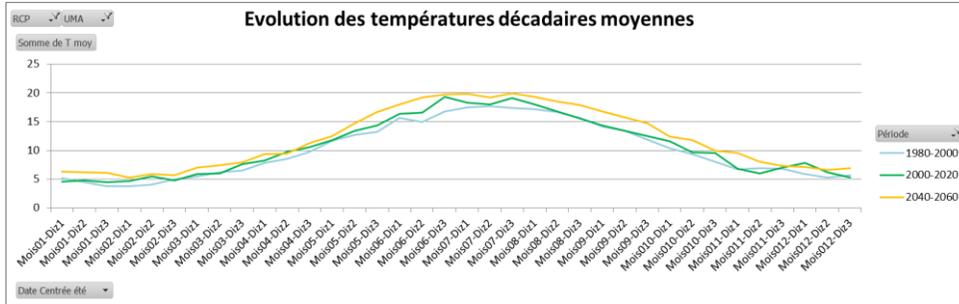
83 : Champagne
crayeuse



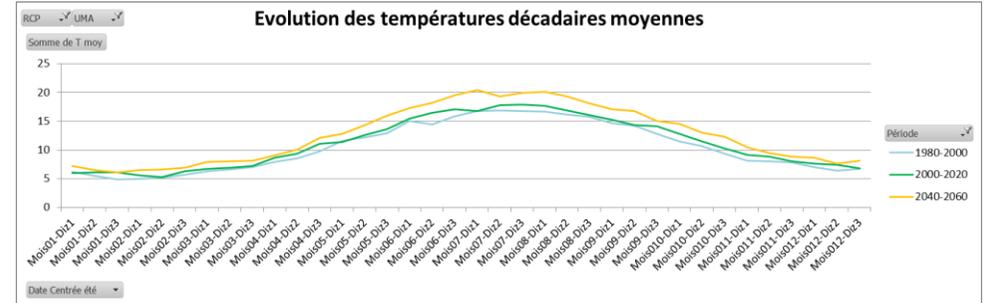
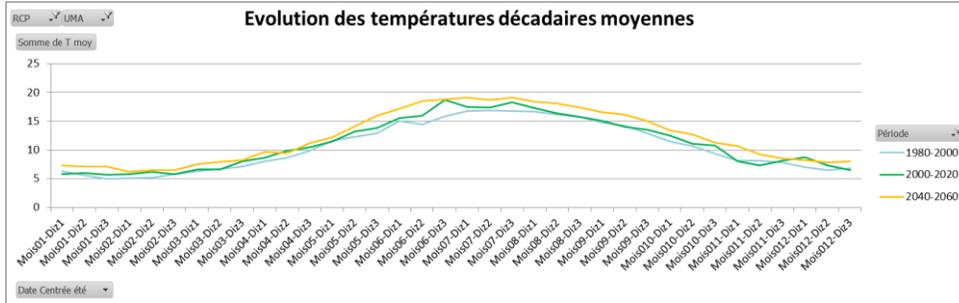
131 : Beauce Sud



322 : Plateau Picard



281 : Pays de Caux



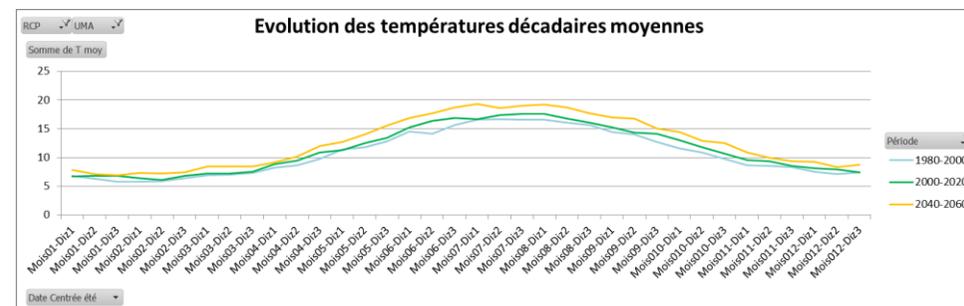
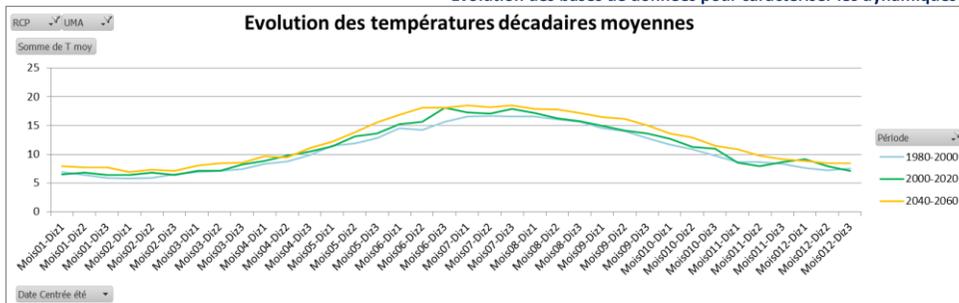


Figure 35 : Evolution des températures moyennes décadaires dans 8 régions contrastées du bassin Seine-Normandie

Evolution des sommes de températures

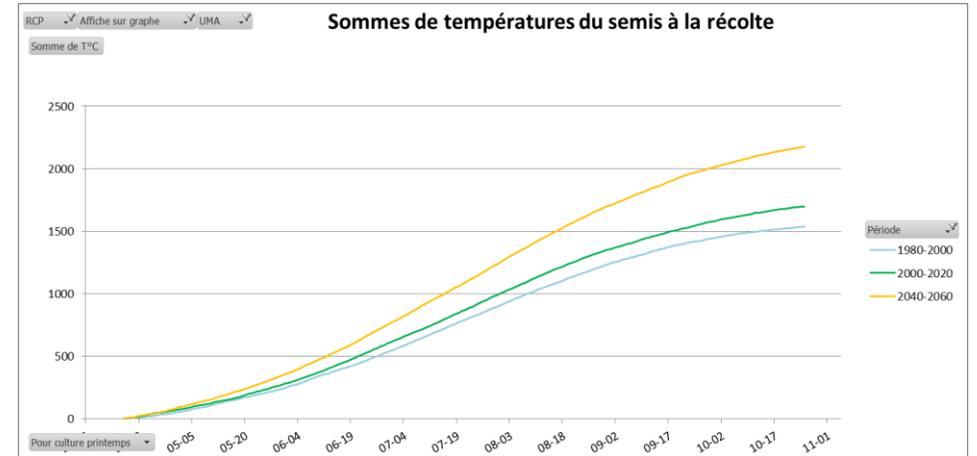
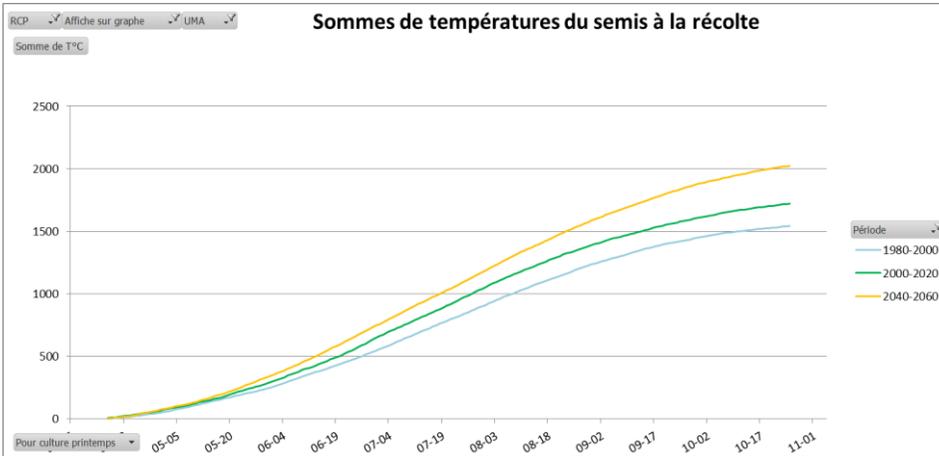
Calcul réalisé sur la base d'une date de semis au 15 avril et d'une date de récolte au 25 octobre, ce qui correspond à la durée d'un cycle « classique » de maïs grain (les dates de semis/récolte peuvent varier suivant les régions, l'objectif étant d'avoir un référentiel commun pour chaque région). Calcul réalisé sur une base 6°C.

UMA

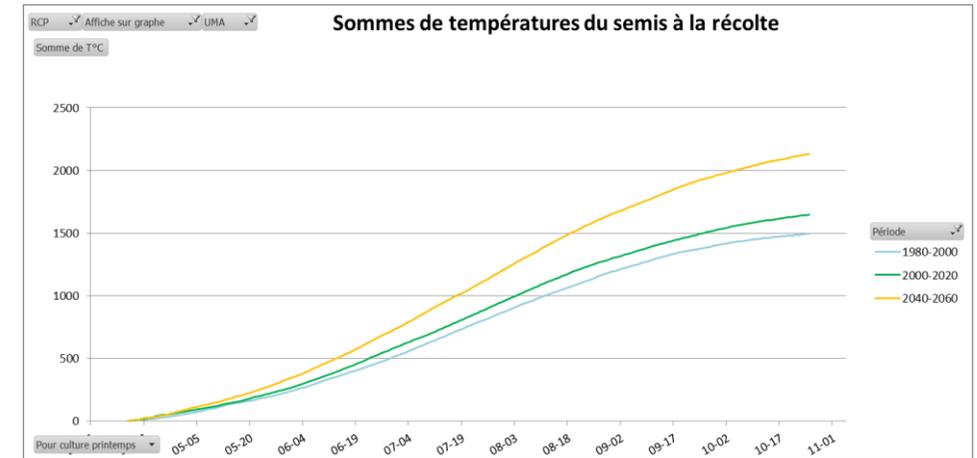
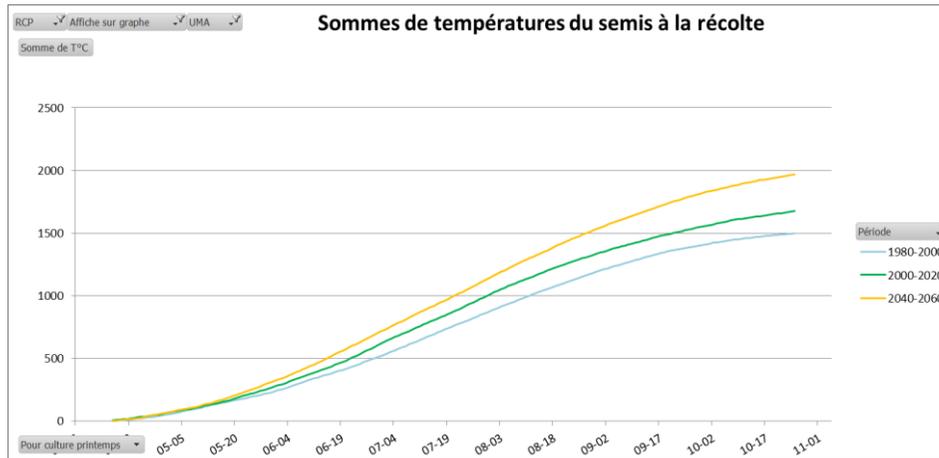
RCP 4.5

RCP 8.5

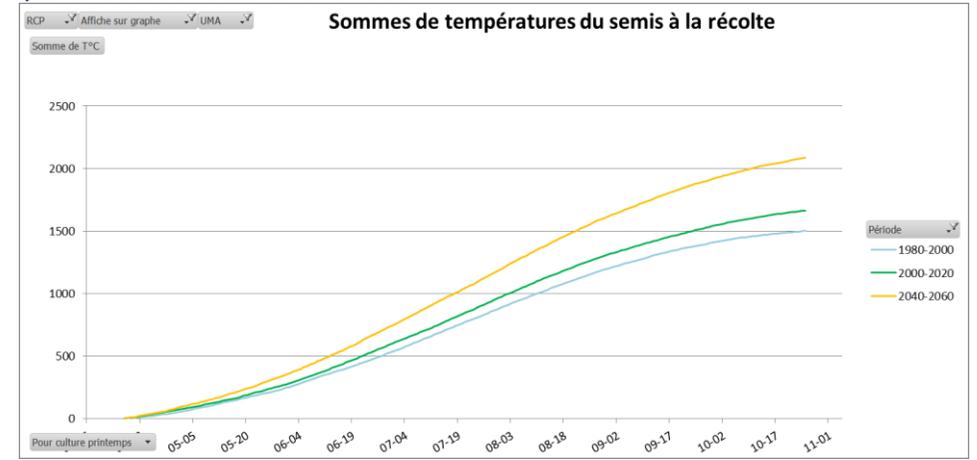
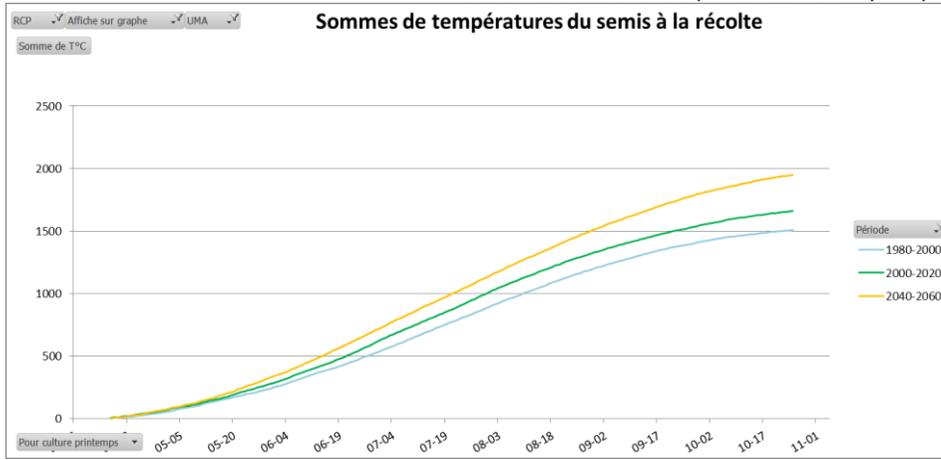
11 : Plateaux de l'Est



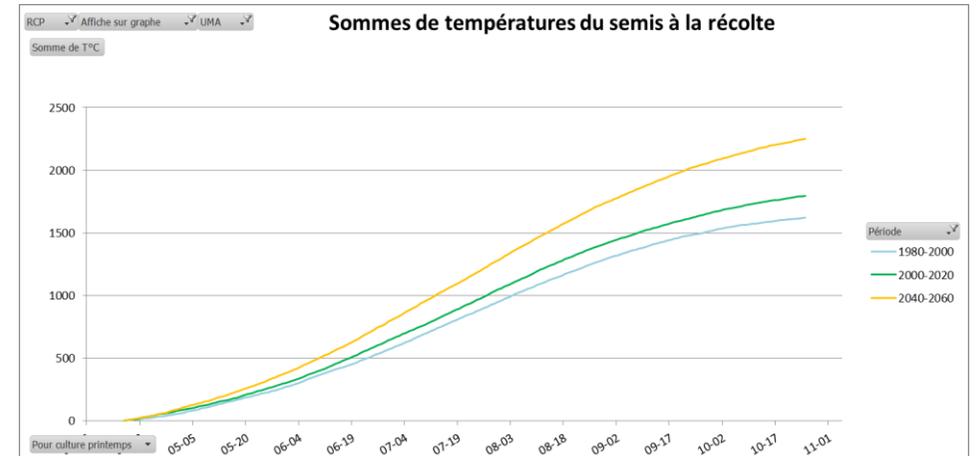
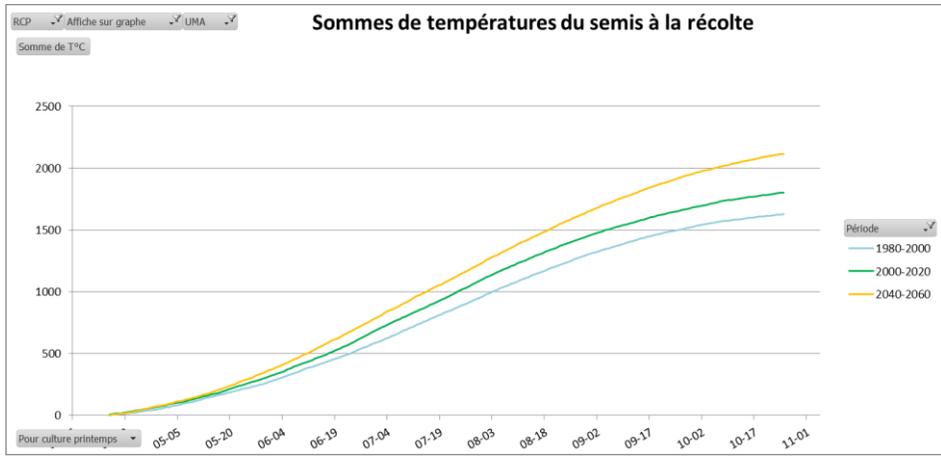
51 : Morvan



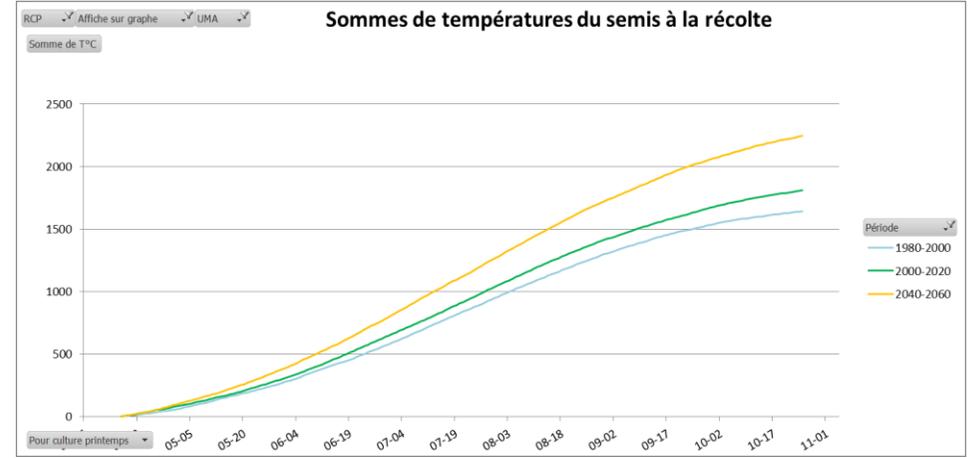
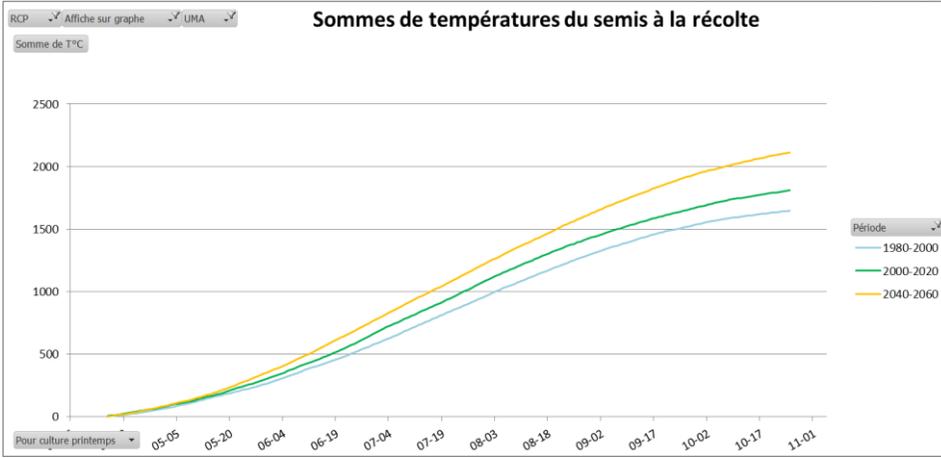
93 : Thiérache



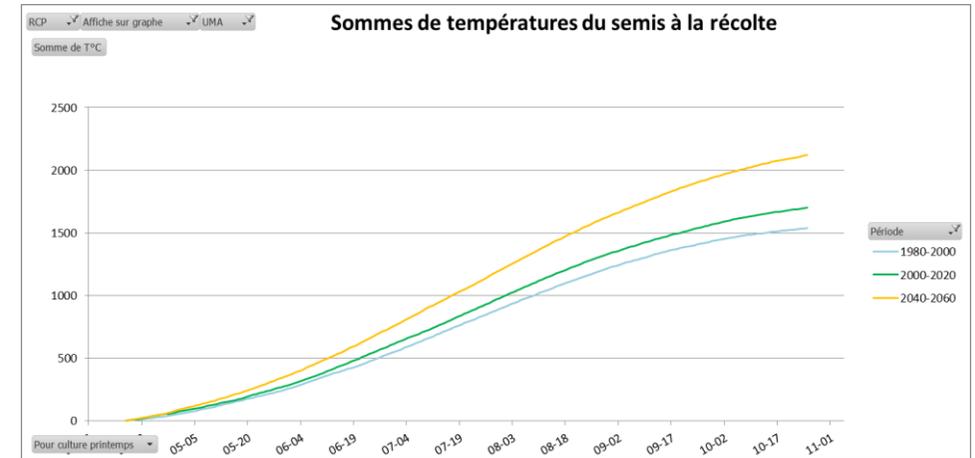
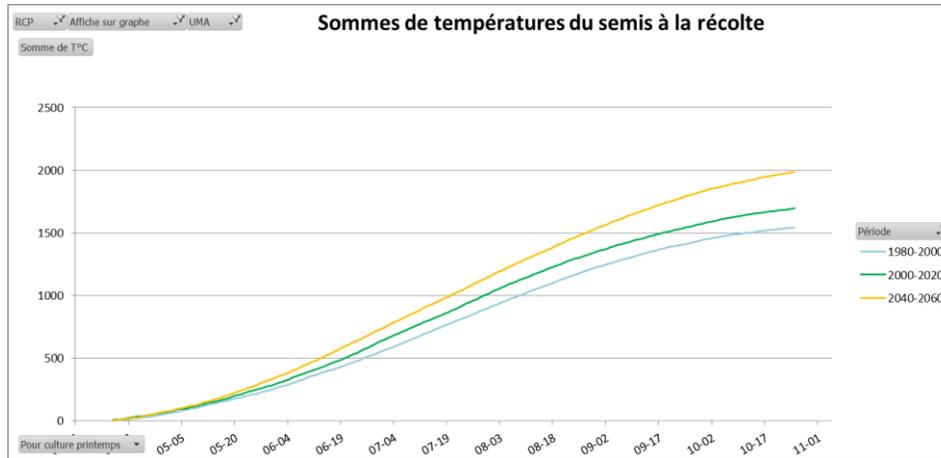
83 : Champagne crayeuse



131 : Beauce Sud



322 : Plateau Picard



281 : Pays de Caux

253 : Bocage Normand

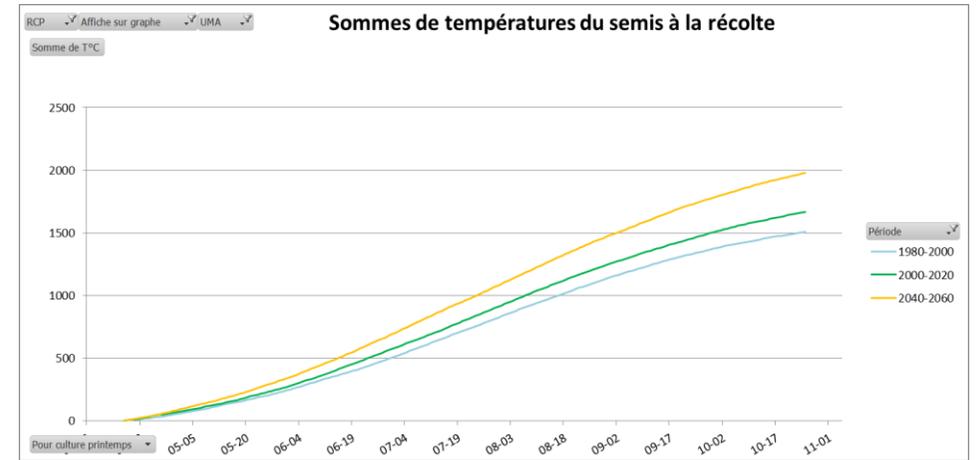
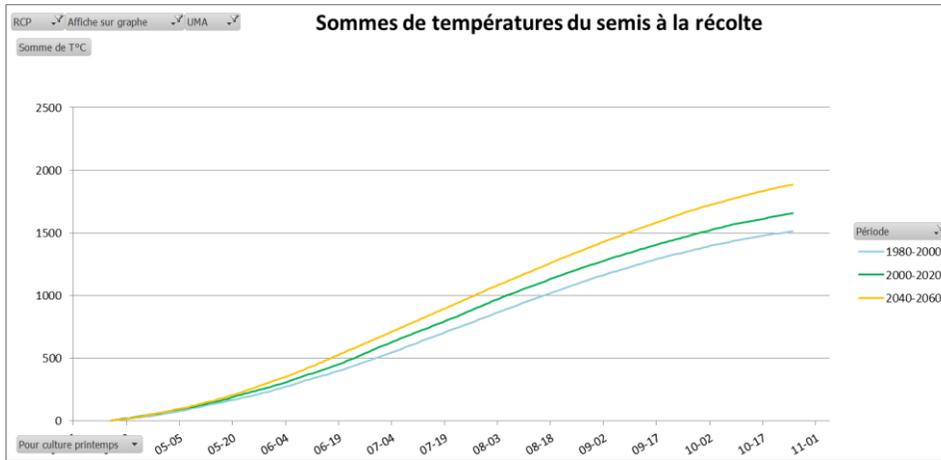
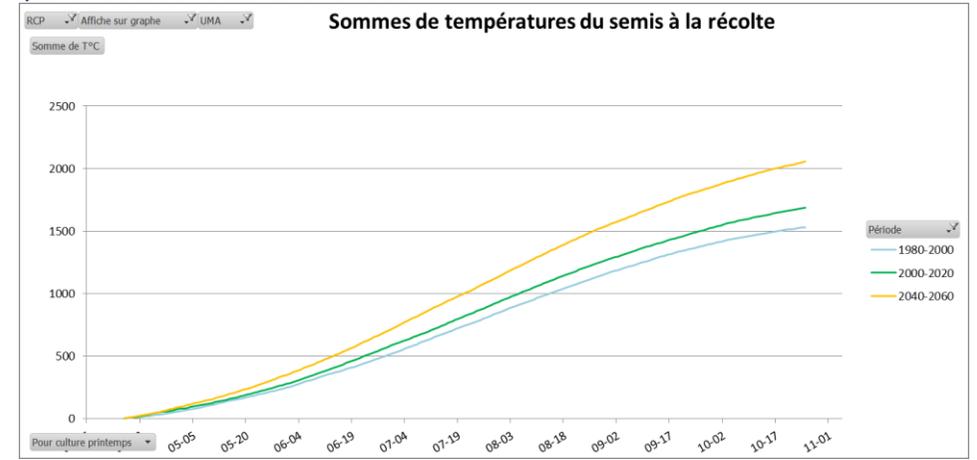
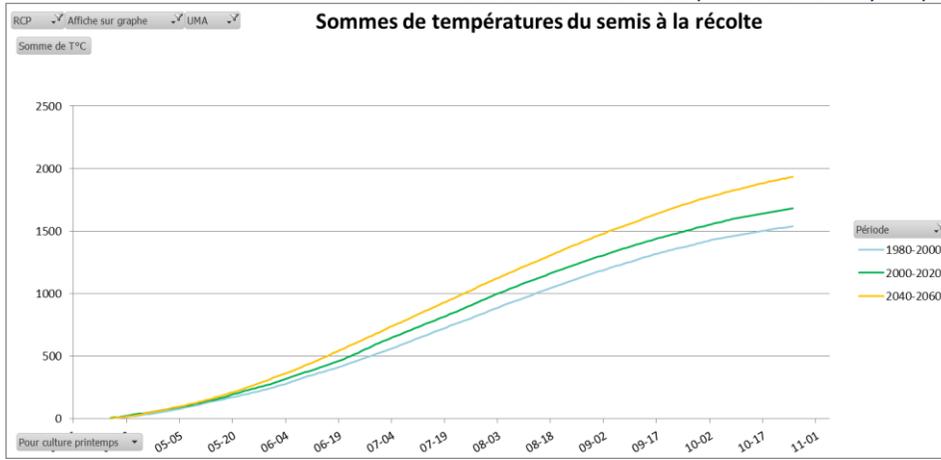
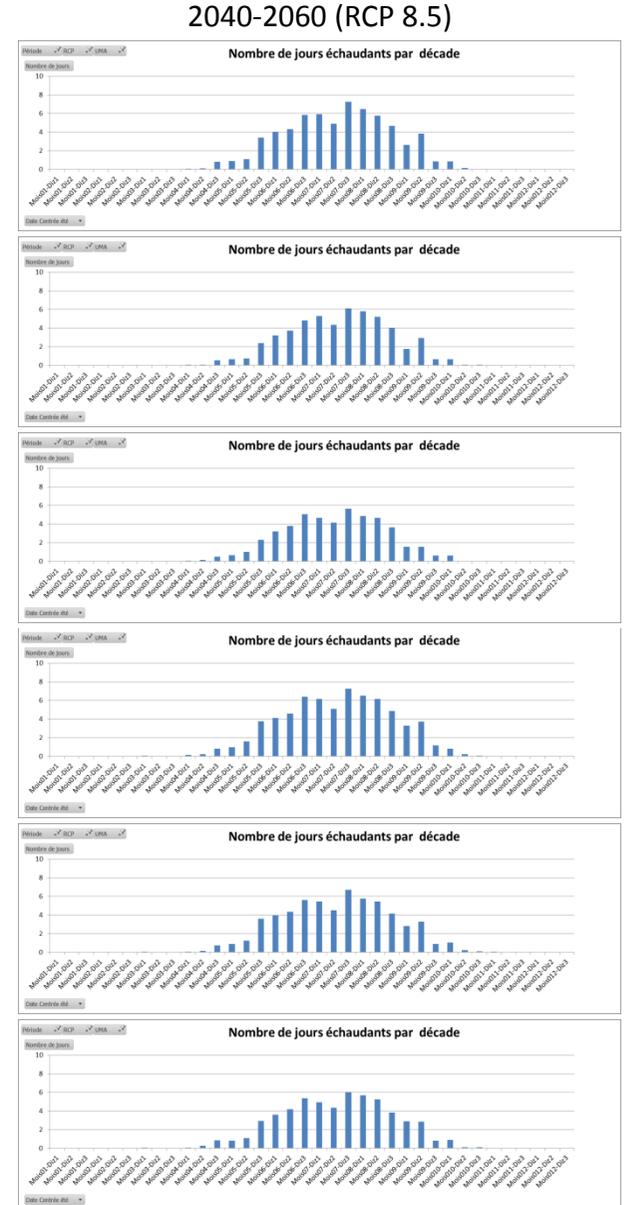
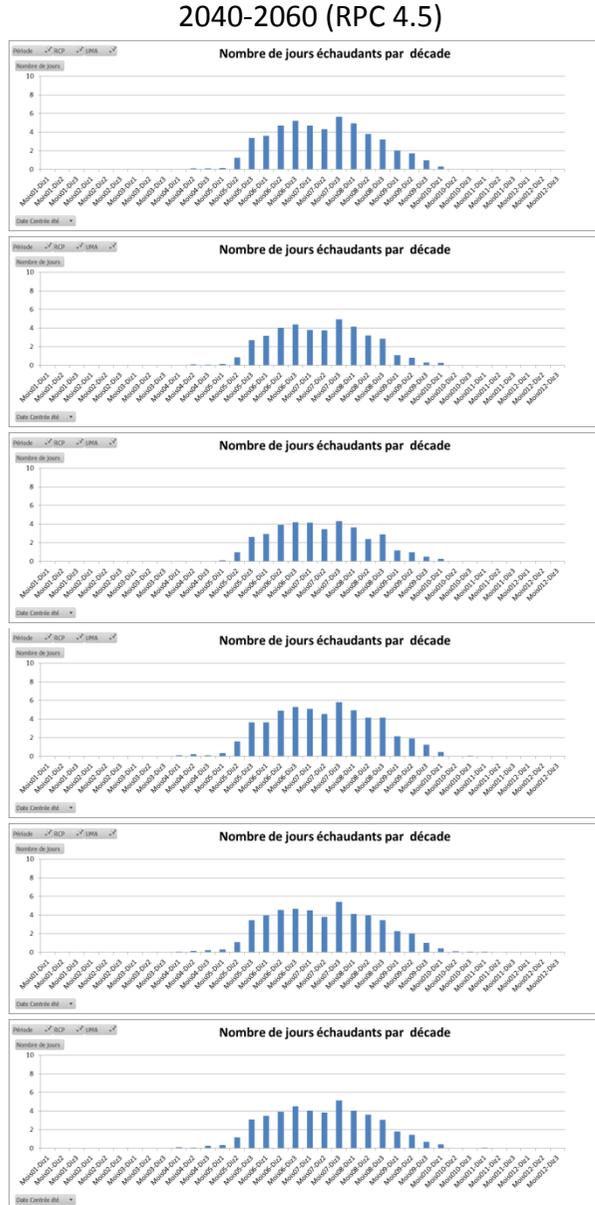
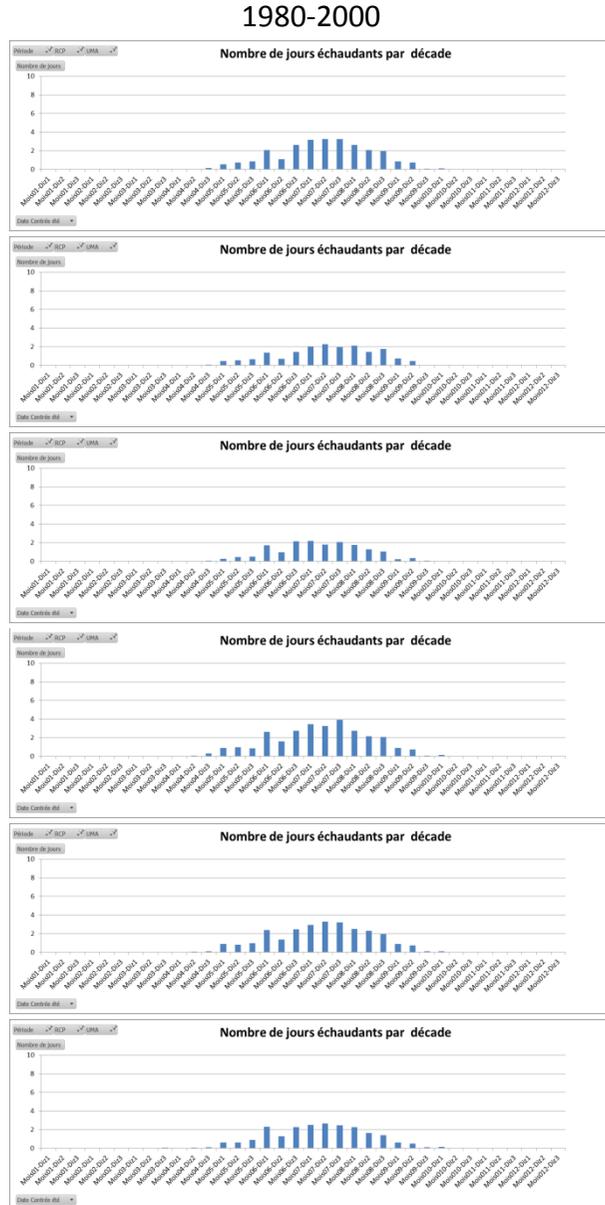


Figure 36 : Evolution des sommes de température (base 8°C) décadaires dans 8 régions contrastées du bassin Seine-Normandie selon 2 scénarii climatiques

Evolution du nombre de jours chauds

UMA
Pla-
de
11 :
teux
l'Est
Morvan
51 :
Thié-
93 :
rache
Cham-
83 :
paigne
crayeuse
Beauce Sud
131 :
Pla-
322 :
teau Picard



Modélisation des pollutions diffuses d'origine agricole sur le bassin Seine-Normandie - Volume 1
Evolution des bases de données pour caractériser les dynamiques des systèmes de culture sur le bassin Seine-Normandie

281 : Pays de Caux
253 : Bocage Normand

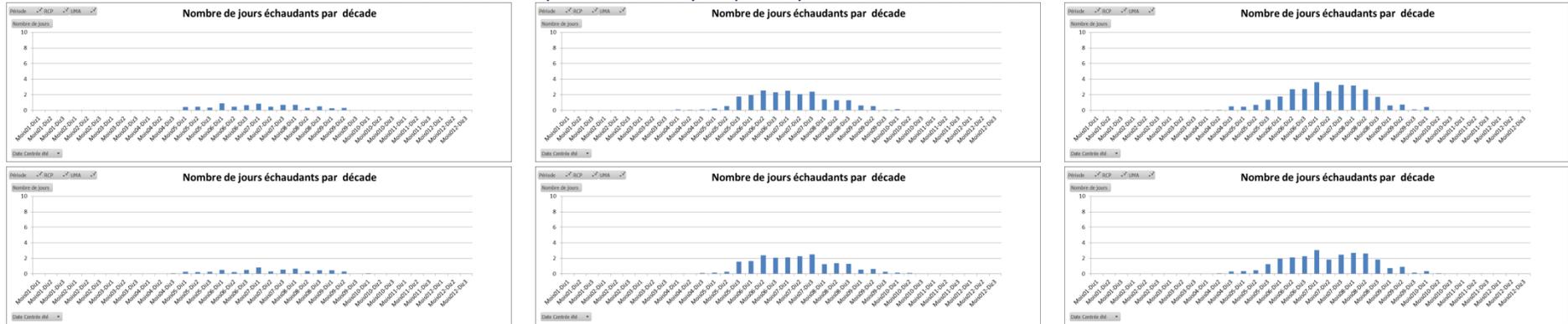
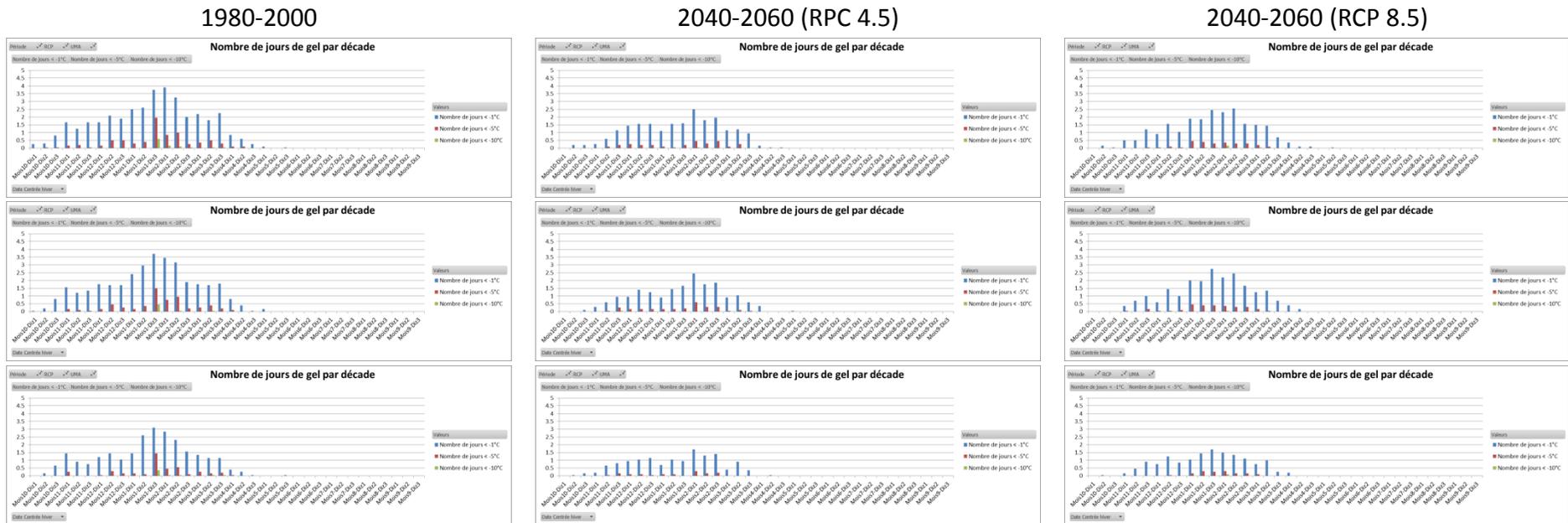


Figure 37 : Evolution des du nombre de jours chauds ($T > +25^{\circ}\text{C}$) dans 8 régions contrastées du bassin Seine-Normandie selon 2 scénarii climatiques

Evolution du nombre de jours de gel

UMA
11 : Platteaux de l'Est
51 : Morvan
93 : Thiérache



253 : Bocage Normand
281 : Pays de Caux
322 : teau Picard
131 : Beauce Sud
83 : Cham-pagne crayeuse



Figure 38 : Evolution du nombre de jours de gel dans 8 régions contrastées du bassin Seine-Normandie selon 2 scénarii climatiques

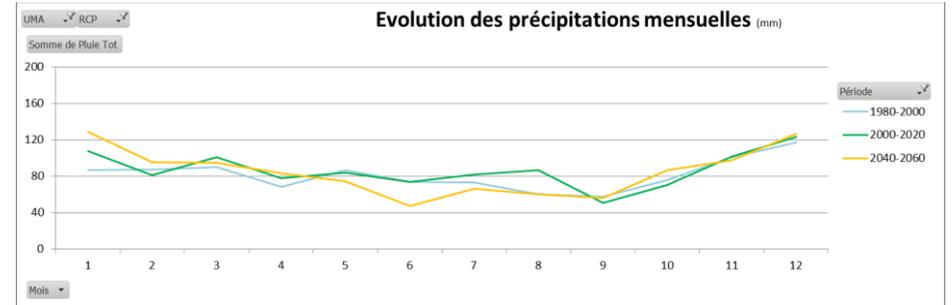
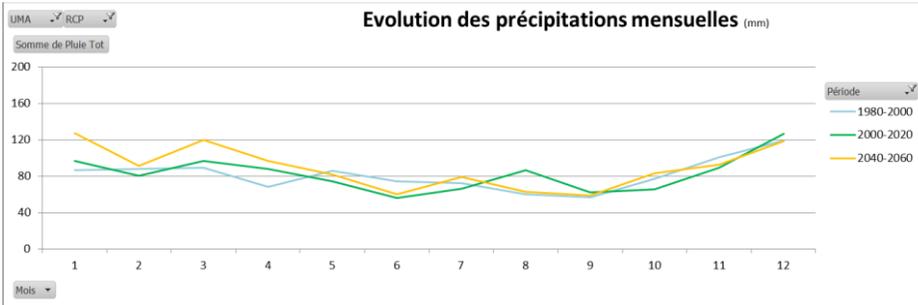
Evolution des précipitations

UMA

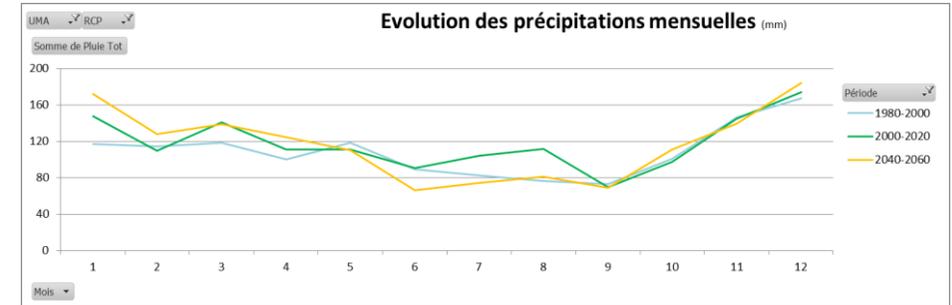
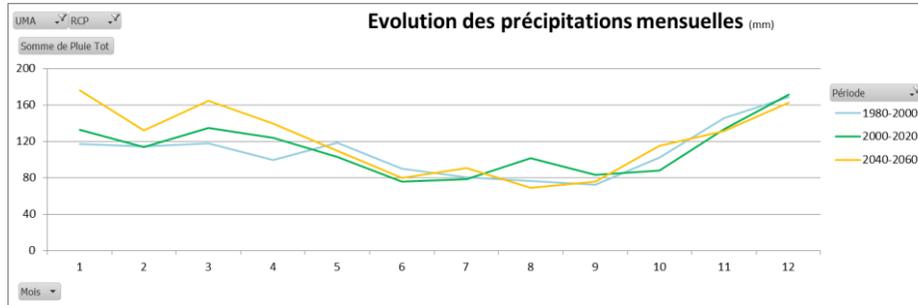
RCP 4.5

RCP 8.5

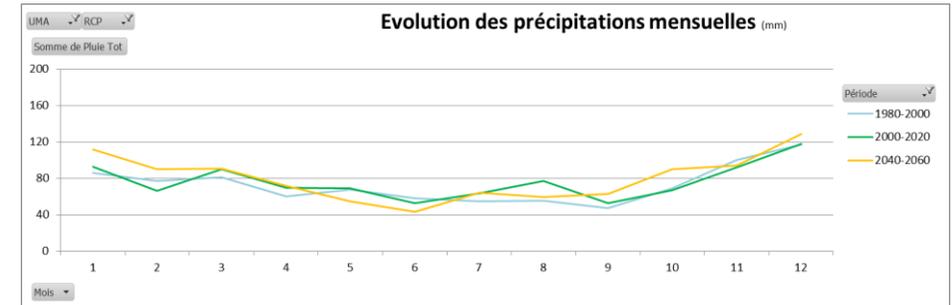
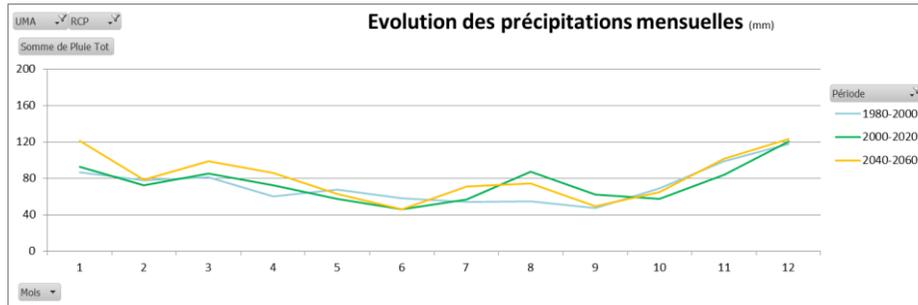
11 : Plateaux de l'Est



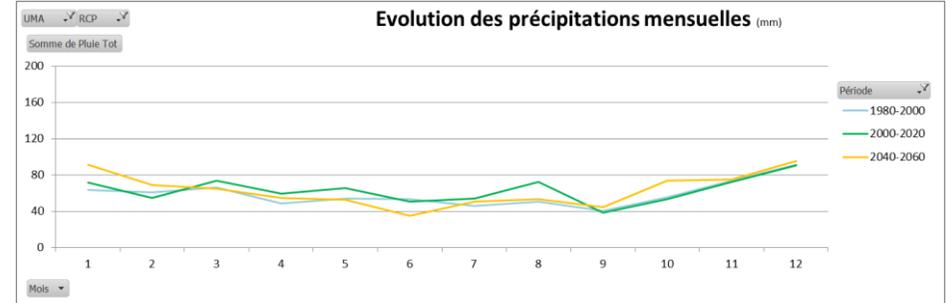
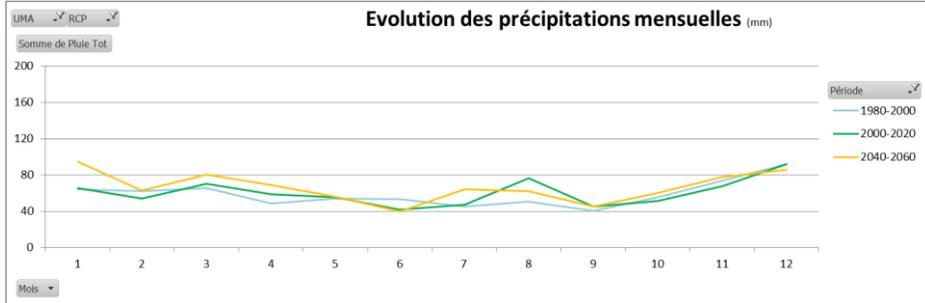
51 : Morvan



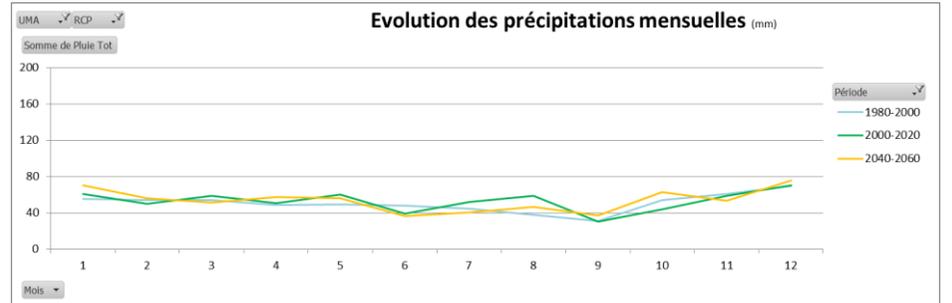
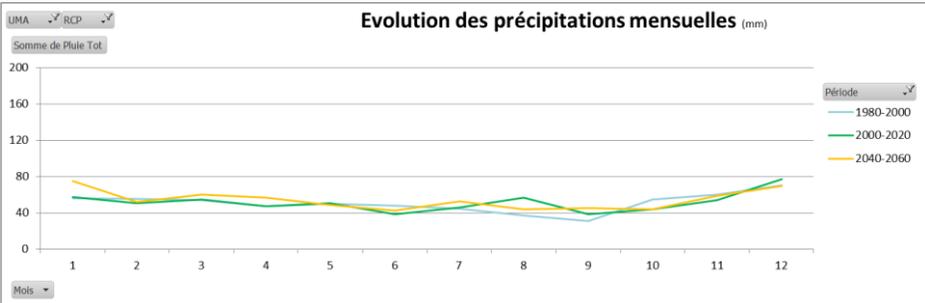
93 : Thiérache



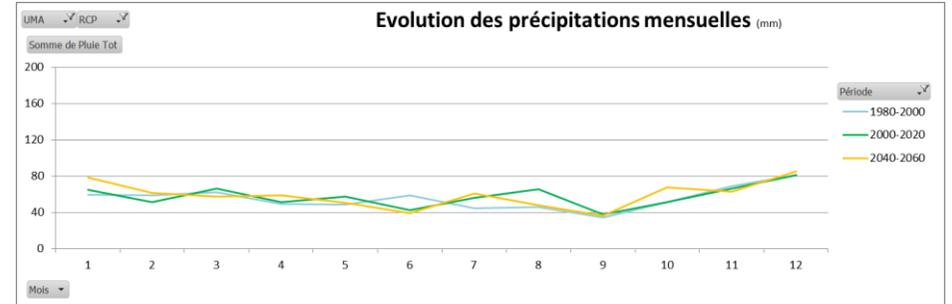
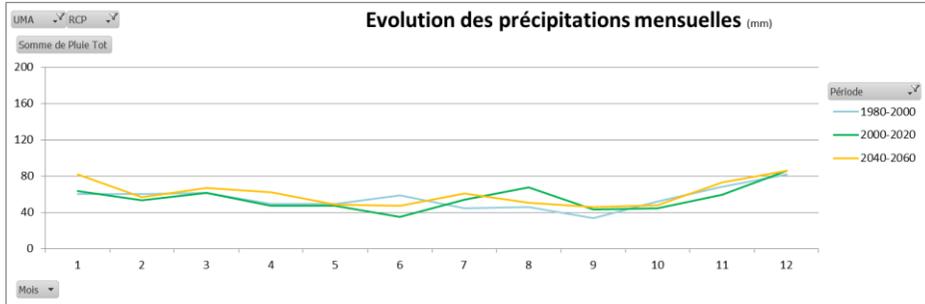
83 : Champagne
crayeuse



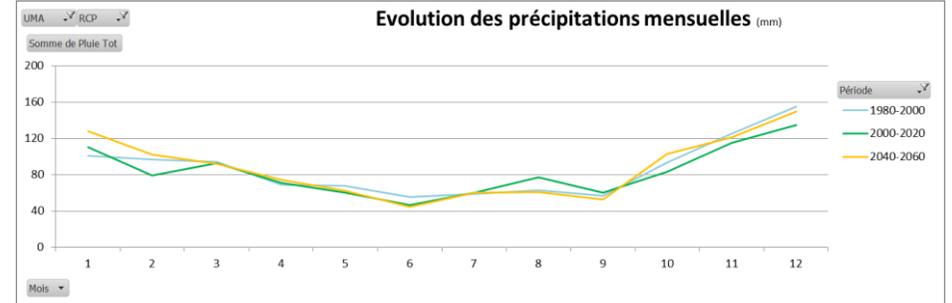
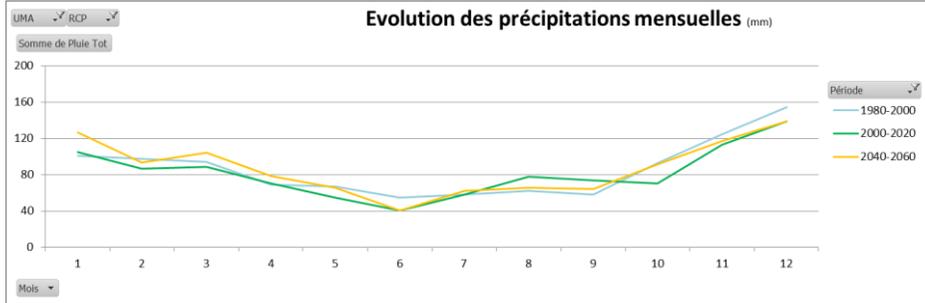
131 : Beauce Sud



322 : Plateau Picard



281 : Pays de Caux



253 : Bocage Normand

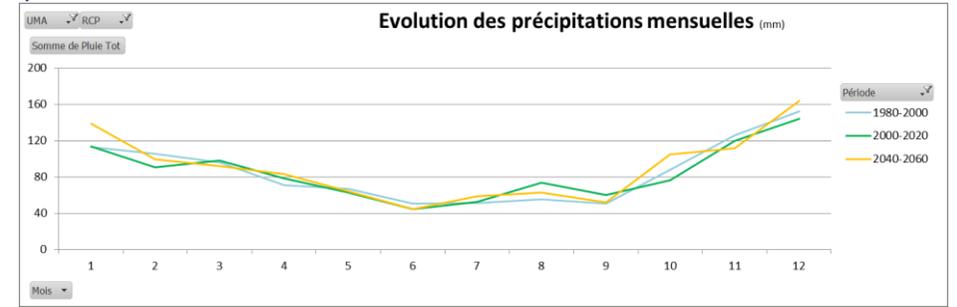
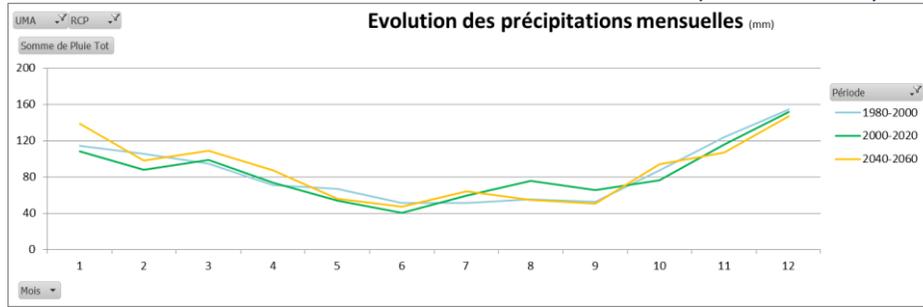
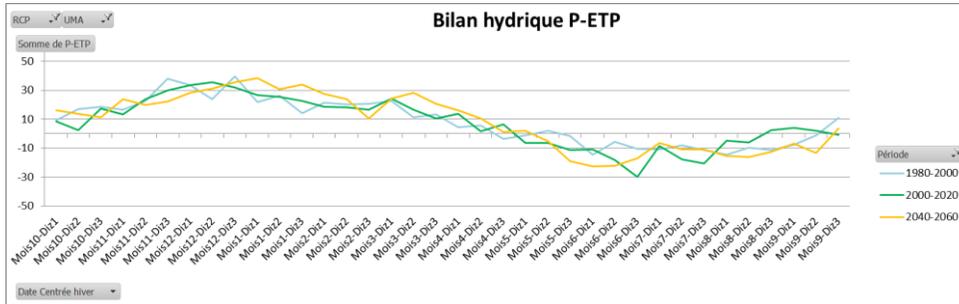


Figure 39 : Evolution précipitations mensuelles dans 8 régions contrastées du bassin Seine-Normandie selon 2 scénarii climatiques

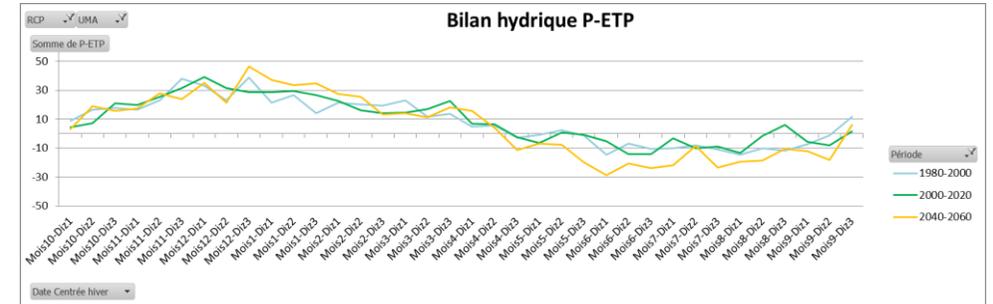
Evolution du bilan hydrique

UMA

RCP 4.5

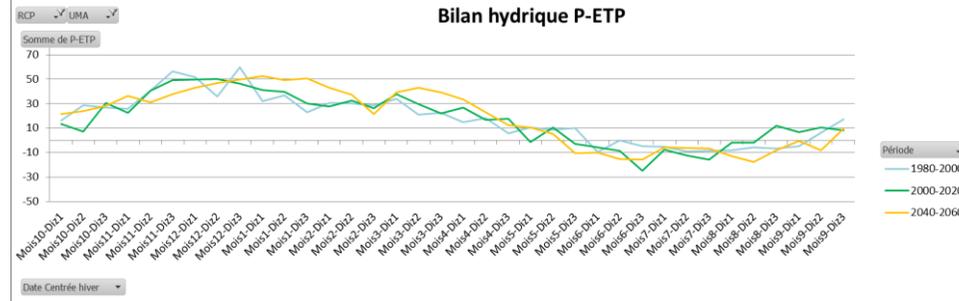


RCP 8.5

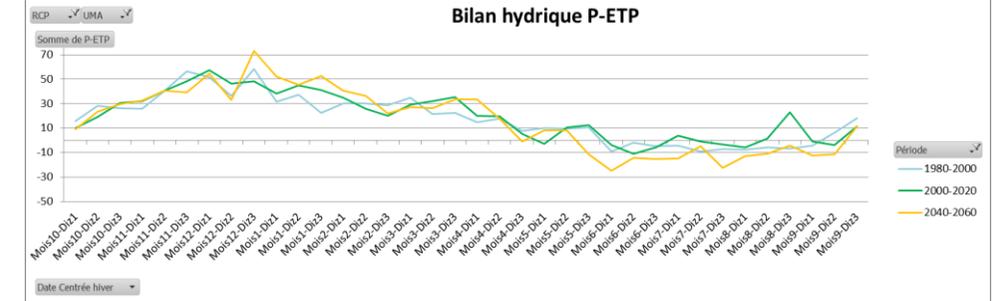


11 : Plateaux de l'Est

Bilan hydrique P-ETP



Bilan hydrique P-ETP

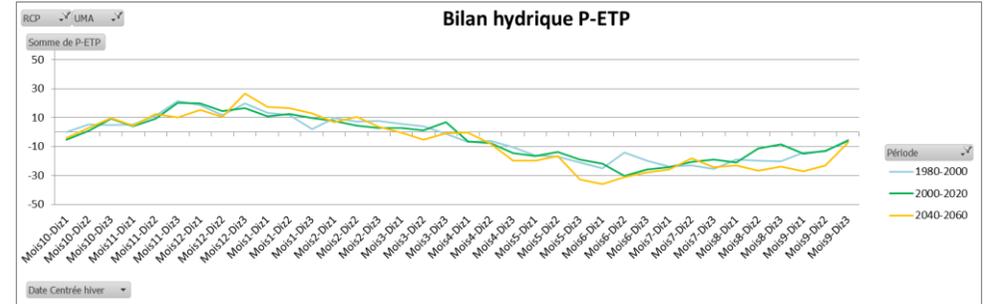
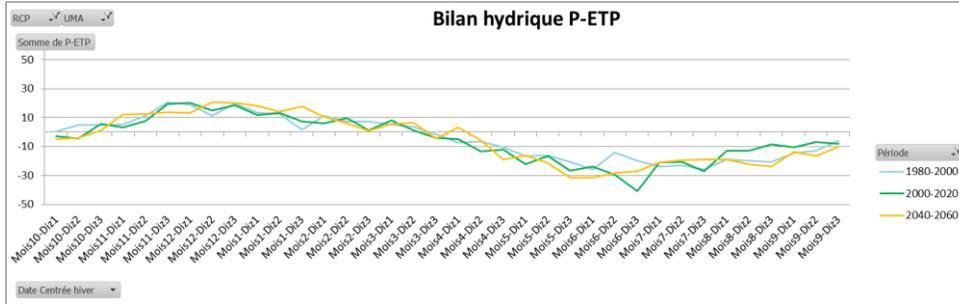
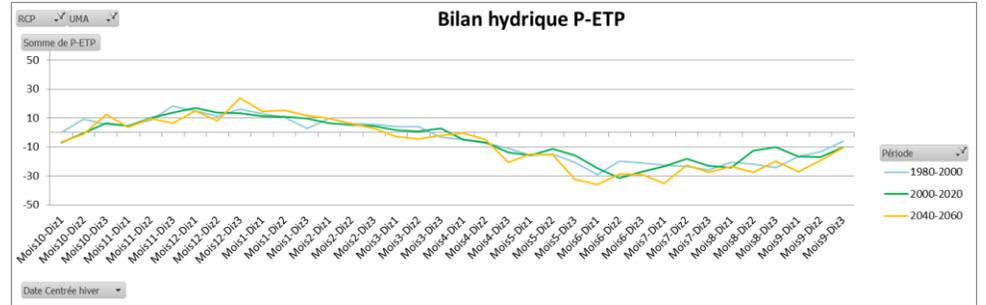
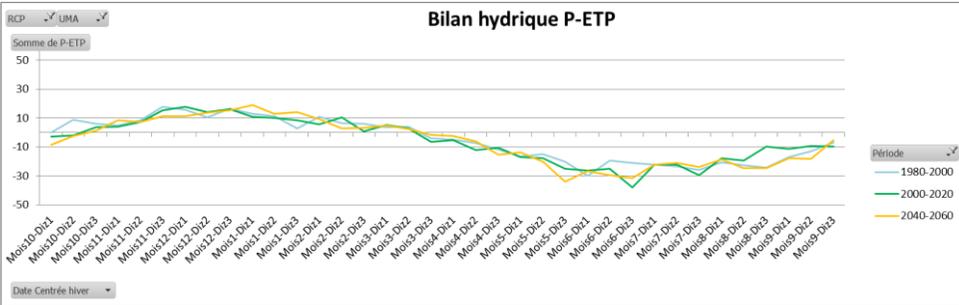
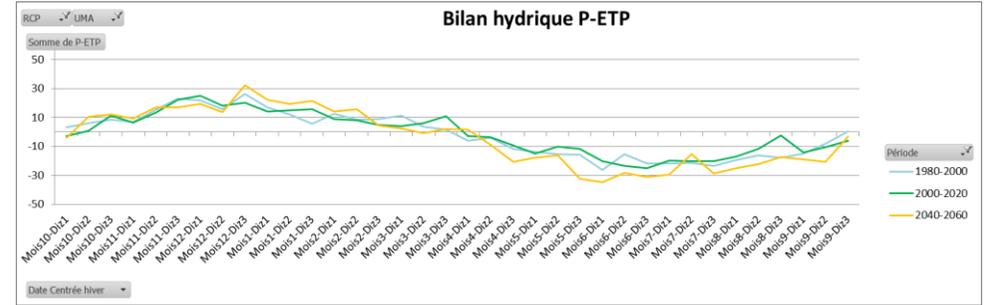
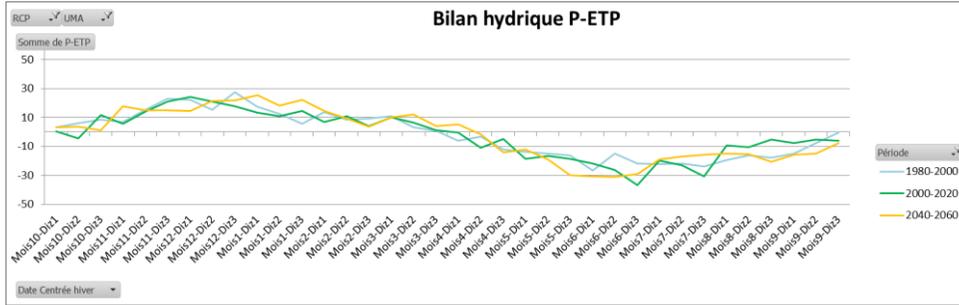
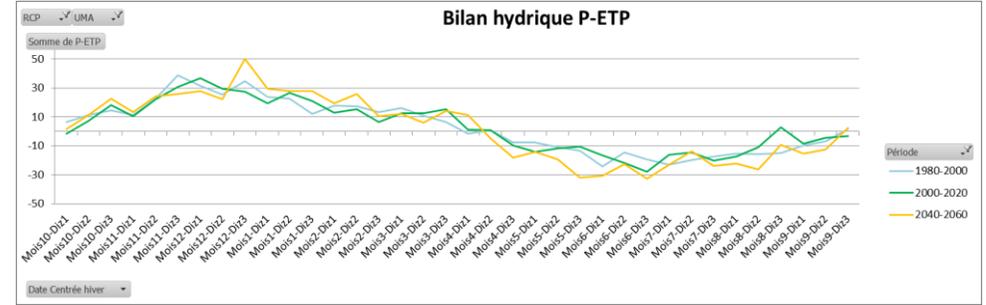
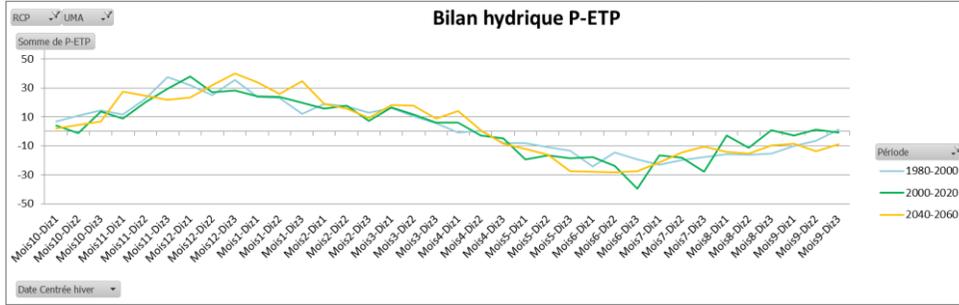


51 : Morvan

83 : Champagne
93 : Thiérache
crayeuse

131 : Beauce Sud

322 : Plateau Picard



281 : Pays de Caux

253 : Bocage Normand



Figure 40 : Evolution du bilan hydrique décadaire dans 8 régions contrastées du bassin Seine-Normandie selon 2 scénarii climatiques

Annexe 4 : Evolution d'assolement des grandes régions agricoles

Cette annexe présente l'évolution des assolements de chaque Grande Région Agricole, déclinée selon chaque scénario (ScenA et ScenB).

Scénario A

Grande région agricole 1

Le maïs grain, le tournesol et le blé tendre se développent au détriment du colza et de l'orge d'hiver (et dans une moindre mesure les cultures fourragères). L'orge de printemps se maintient à des valeurs stables.

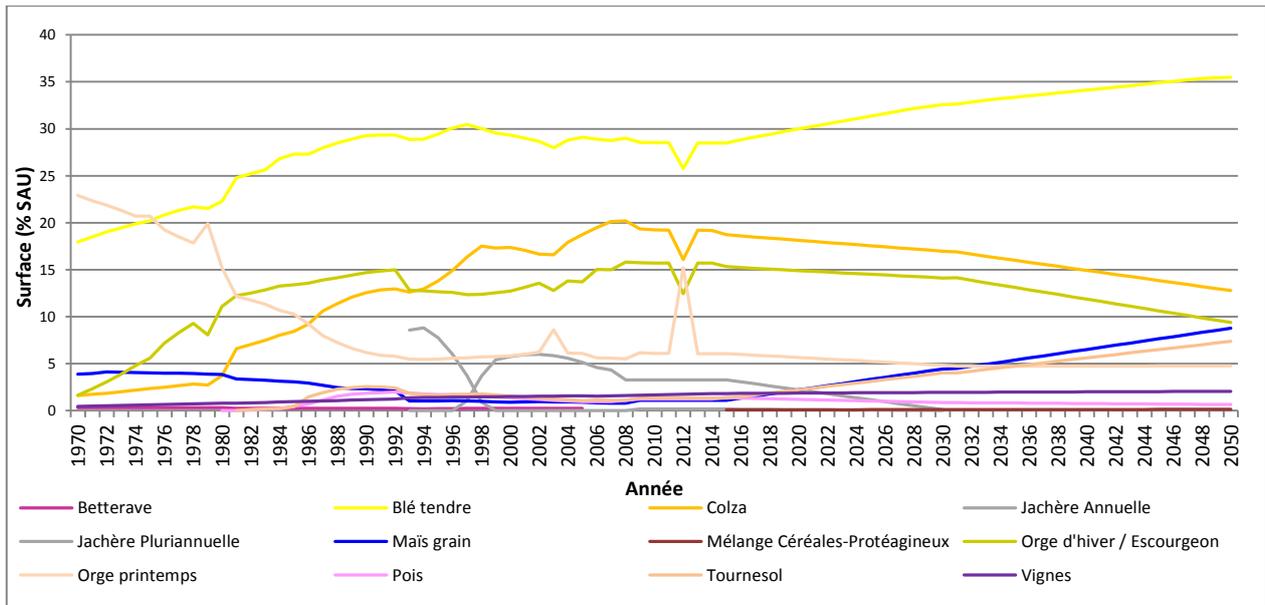


Figure 41 : Evolution des cultures de vente sur la Grande Région Agricole 1 dans le cadre du scénario A

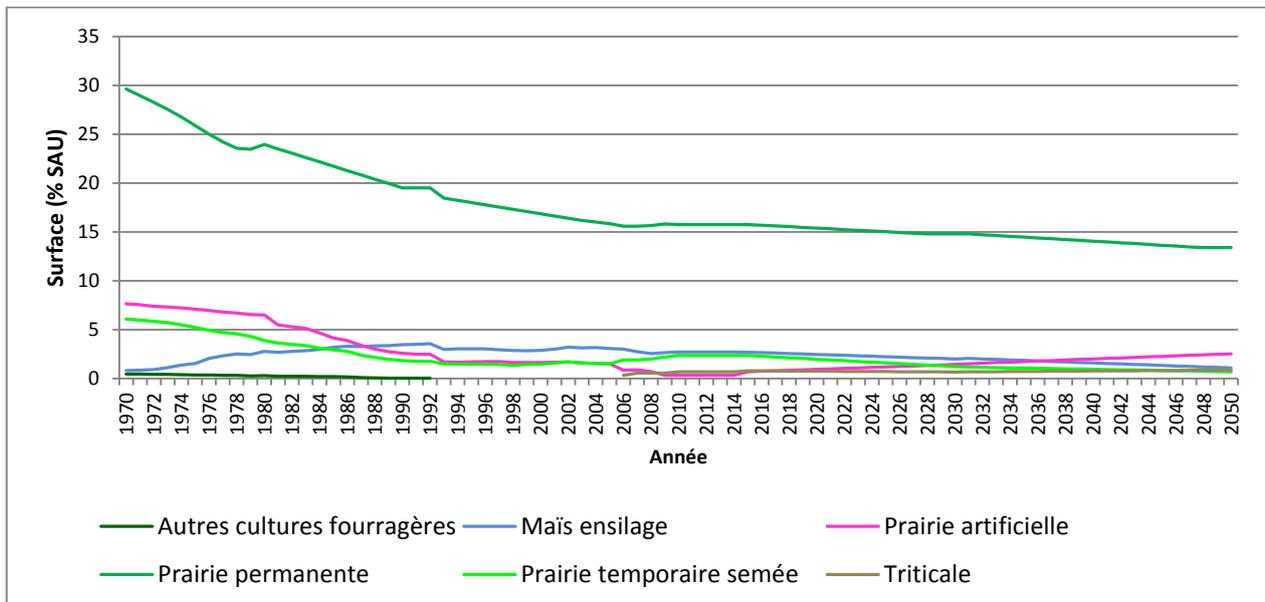


Figure 42 : Evolution des cultures fourragères sur la Grande Région Agricole 1 dans le cadre du scénario A

Grande région agricole 2

Le pois tend à se développer avec le tournesol au détriment du colza. Les surfaces fourragères restent stables, voire en légère progression pour les prairies permanentes.

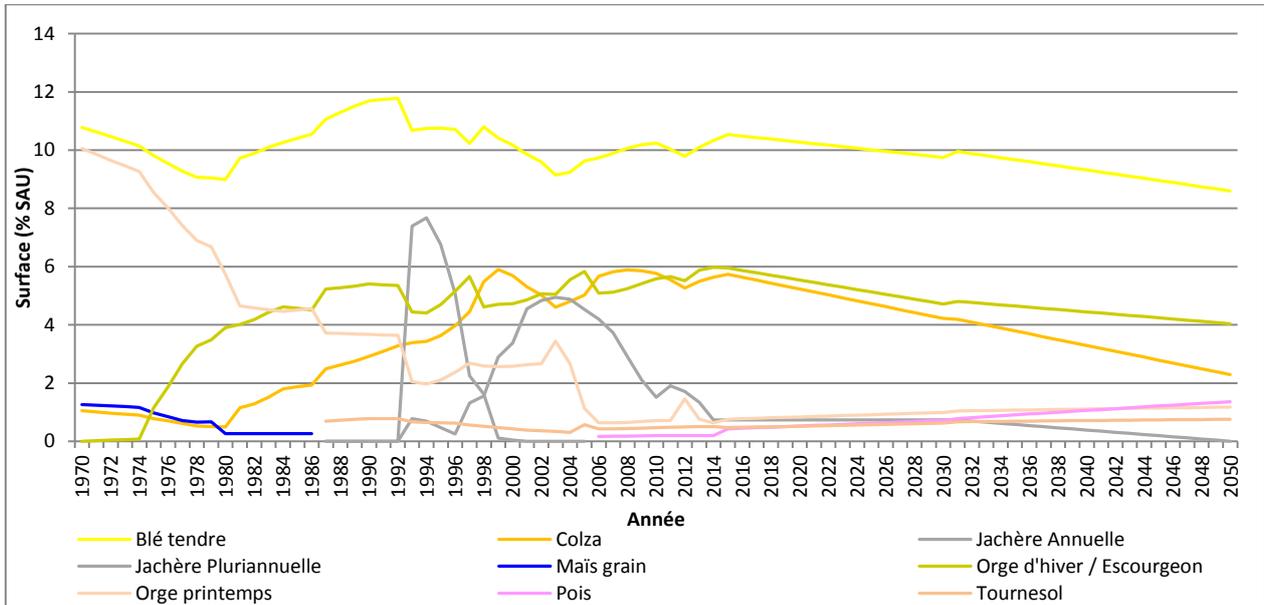


Figure 43 : Evolution des cultures de vente sur la Grande Région Agricole 2 dans le cadre du scénario A

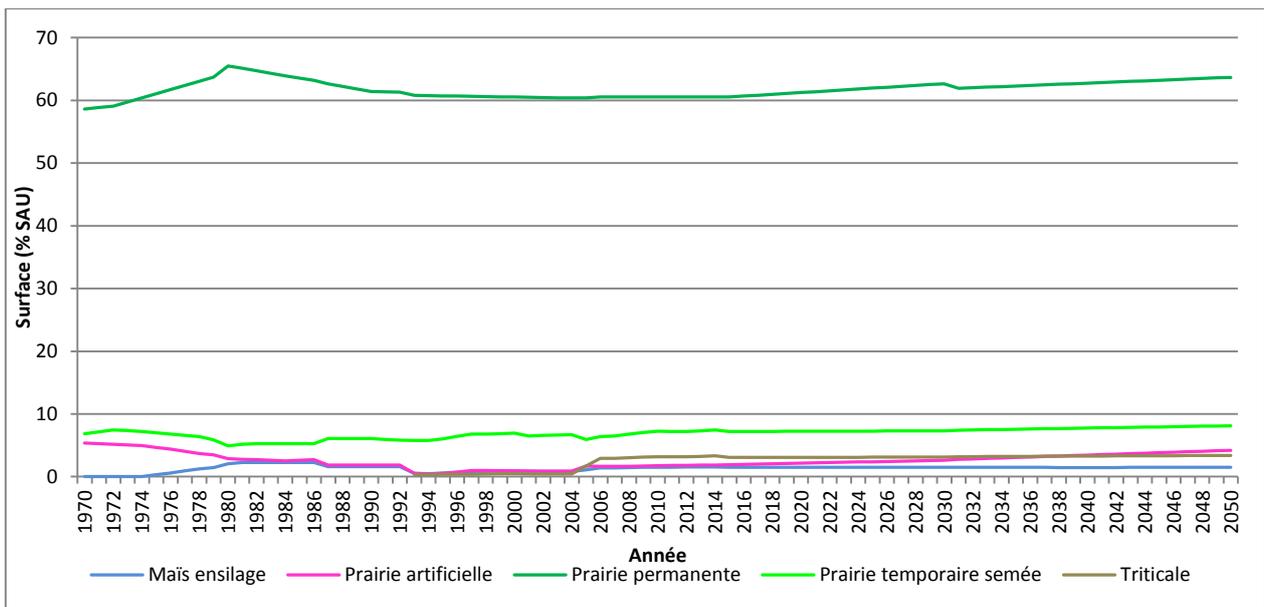


Figure 44 : Evolution des cultures fourragères sur la Grande Région Agricole 2 dans le cadre du scénario A

Grande région agricole 3

Les surfaces fourragères se maintiennent à des niveaux faibles. Les prairies permanentes régressent légèrement à l'échelle de la GRA mais avec de fortes disparités (augmentation au Nord, diminution au Sud). Le maïs grain connaît une forte progression, au détriment des orges et du colza.

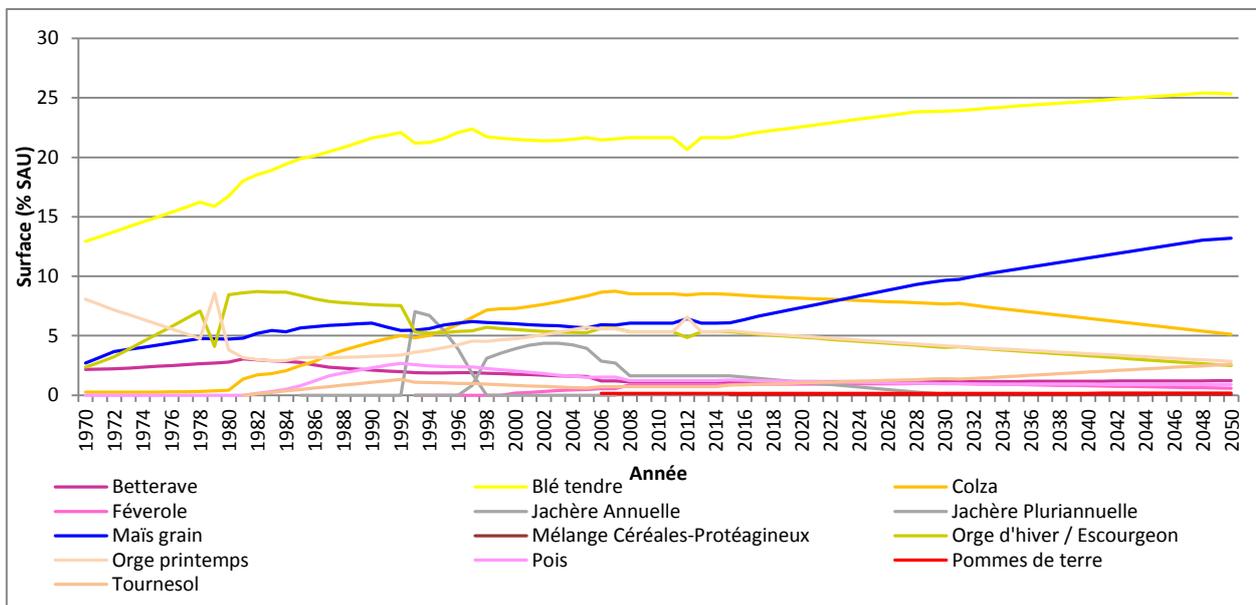


Figure 45 : Evolution des cultures de vente sur la Grande Région Agricole 3 dans le cadre du scénario A

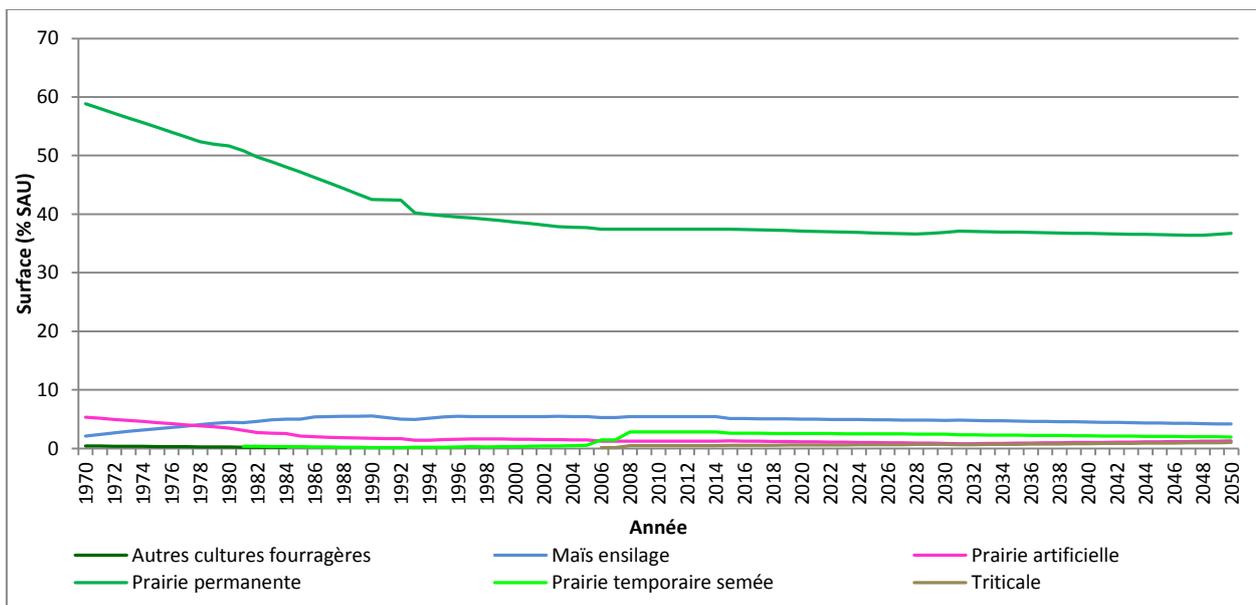


Figure 46 : Evolution des cultures fourragères sur la Grande Région Agricole 3 dans le cadre du scénario A

Grande région agricole 4

Les prairies permanentes continuent de fortement régresser jusqu'en 2050 alors que les autres surfaces fourragères restent stables. Le blé tendre et le maïs grain progressent en surface.

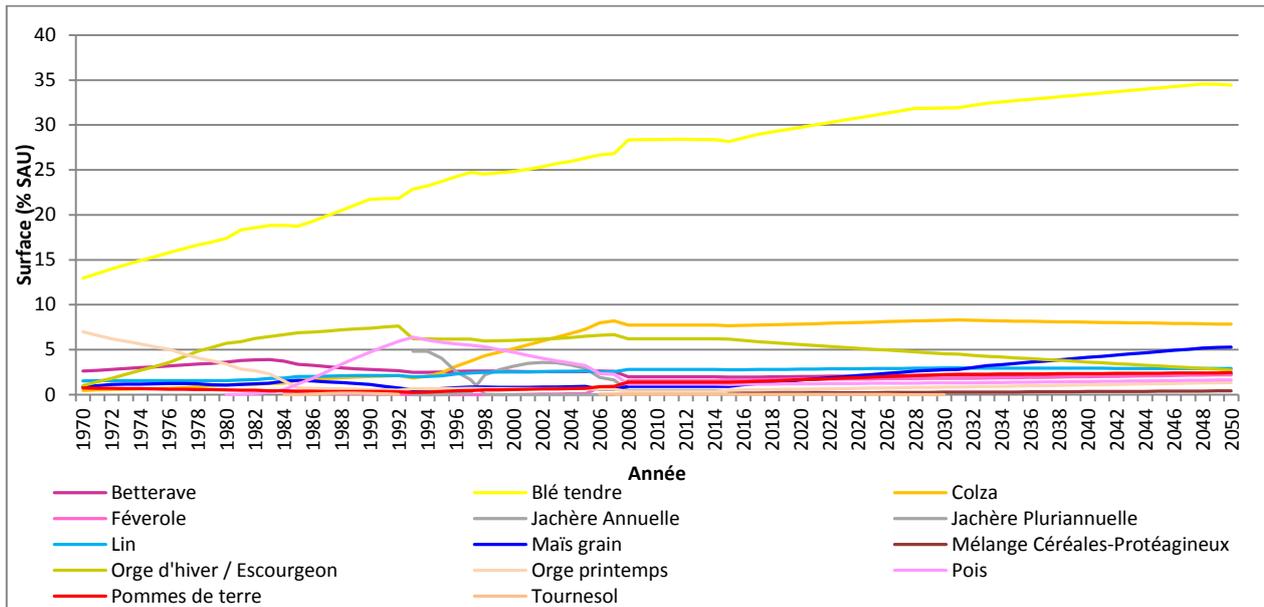


Figure 47 : Evolution des cultures de vente sur la Grande Région Agricole 4 dans le cadre du scénario A

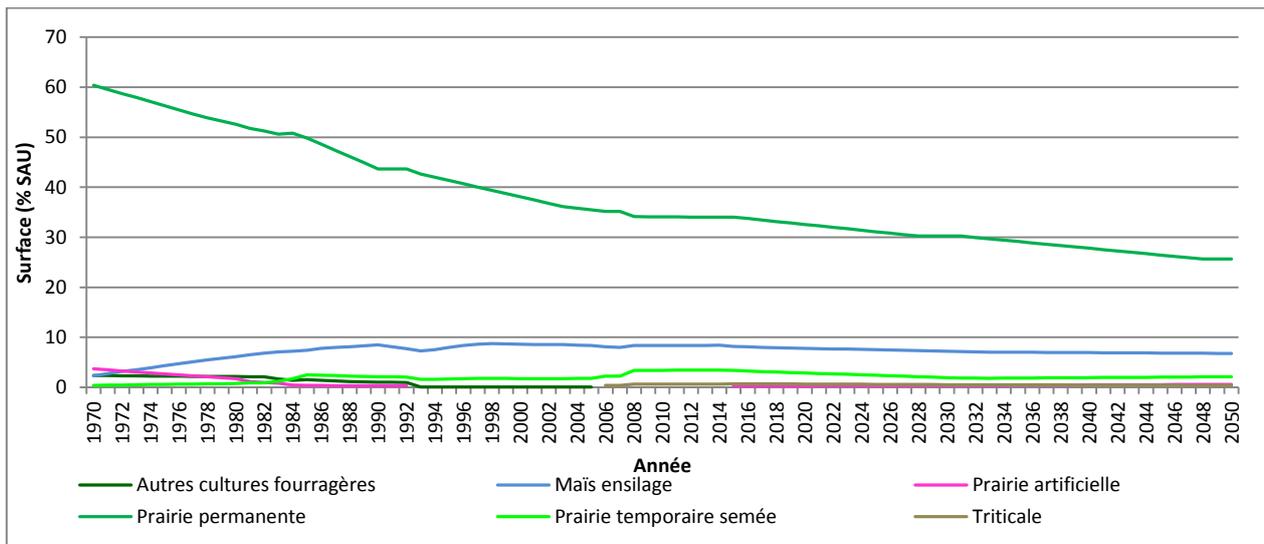


Figure 48 : Evolution des cultures fourragères sur la Grande Région Agricole 4 dans le cadre du scénario A

Grande région agricole 5

Les surfaces en prairies permanentes sont en régression constante et remplacées par des prairies temporaires, du maïs fourrage et des surfaces en céréales (blé tendre et orge de printemps).

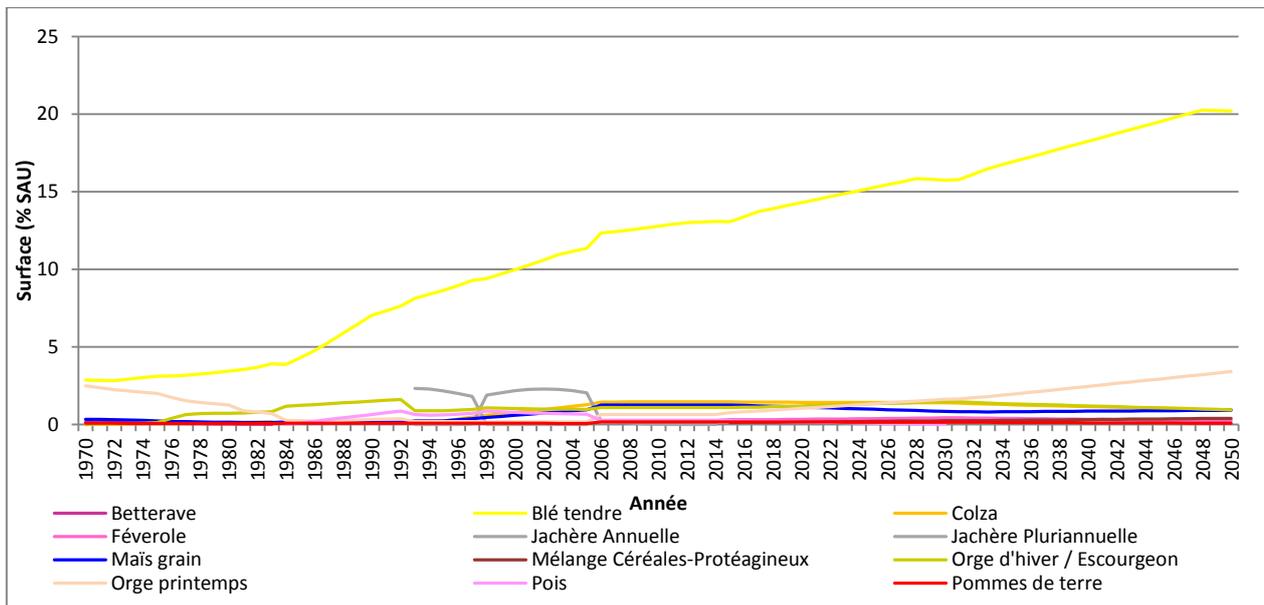


Figure 49 : Evolution des cultures de vente sur la Grande Région Agricole 5 dans le cadre du scénario A

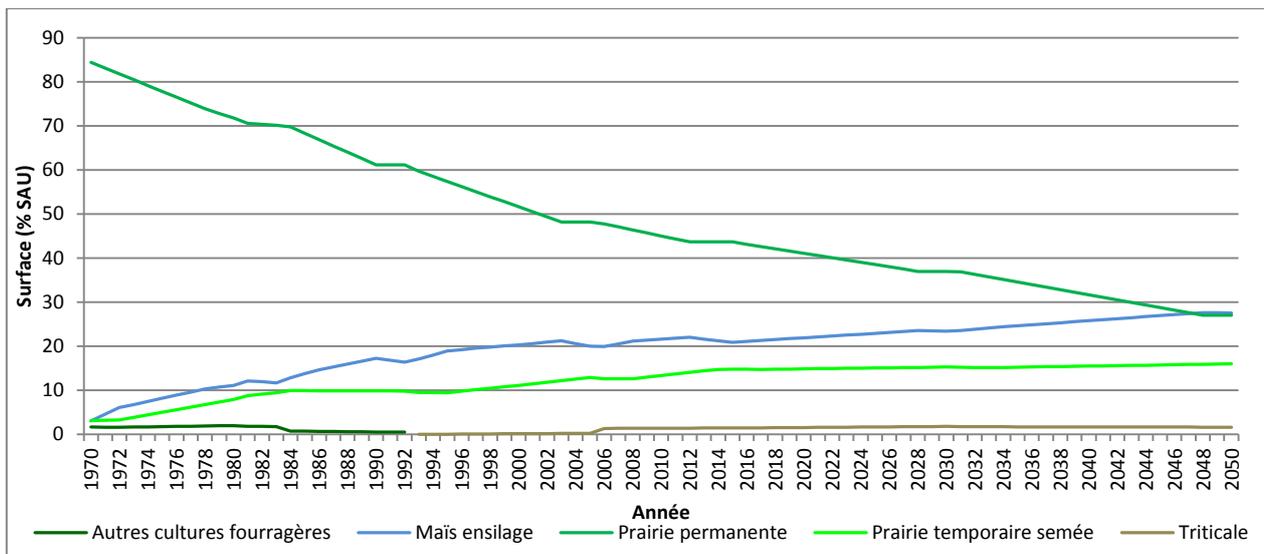


Figure 50 : Evolution des cultures fourragères sur la Grande Région Agricole 5 dans le cadre du scénario A

Grande région agricole 6

Les cultures emblématiques de la grande région se maintiennent (blé, betterave, luzerne en champagne crayeuse). Les prairies permanentes résiduelles dans les UMA périphériques de la grande région continuent à perdre leurs prairies, au profit du maïs grain et des cultures industrielles à forte valeur ajoutée (pomme de terre).

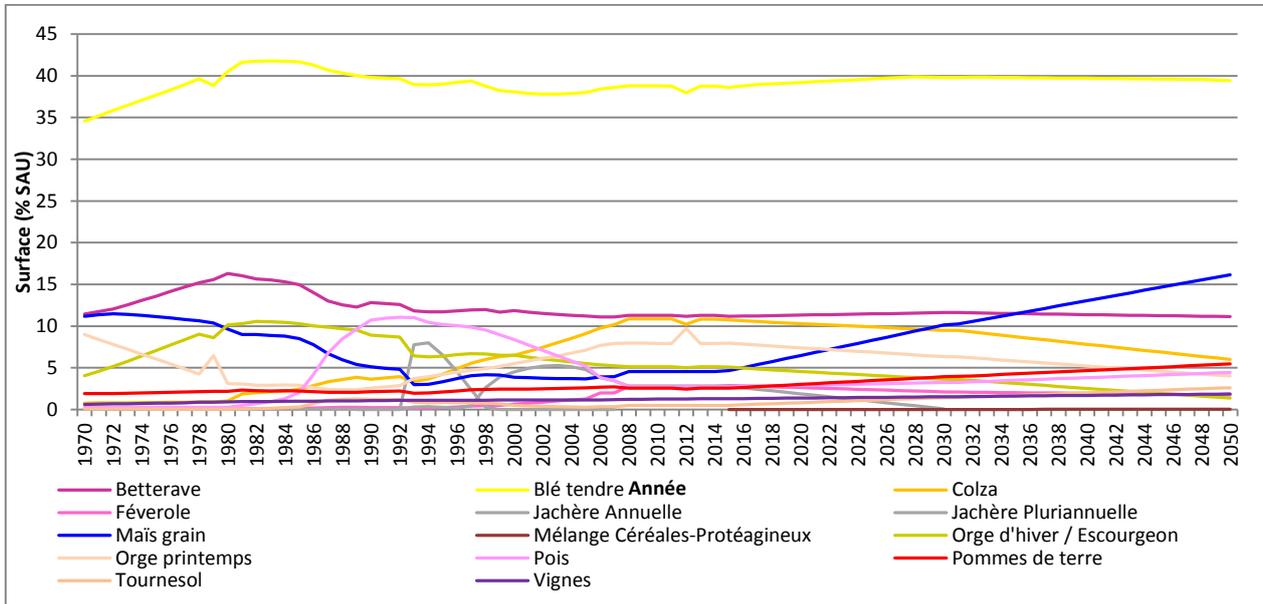


Figure 51 : Evolution des cultures de vente sur la Grande Région Agricole 6 dans le cadre du scénario A

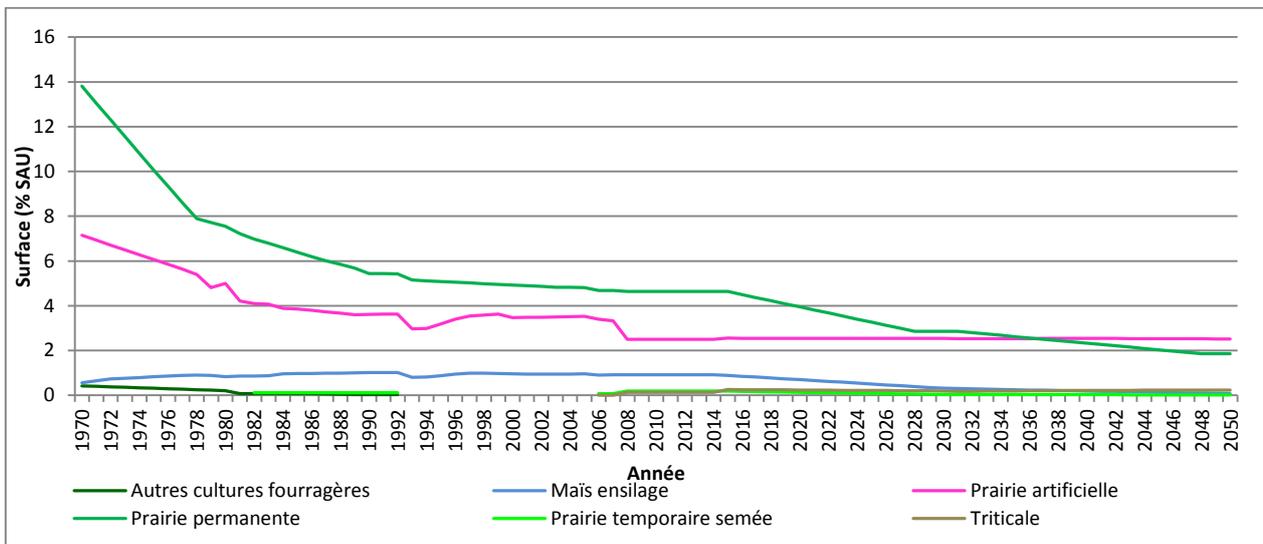


Figure 52 : Evolution des cultures fourragères sur la Grande Région Agricole 6 dans le cadre du scénario A

Grande région agricole 7

Grande région traditionnellement céréalière, la GRA 7 conserve sa dominante de grandes cultures avec une forte progression du maïs dont une partie non négligeable est irriguée en 2050. Le colza et l'orge d'hiver sont en nette régression. Des cultures comme le blé dur ou le tournesol deviennent des cultures non négligeables dans le paysage de la GRA.

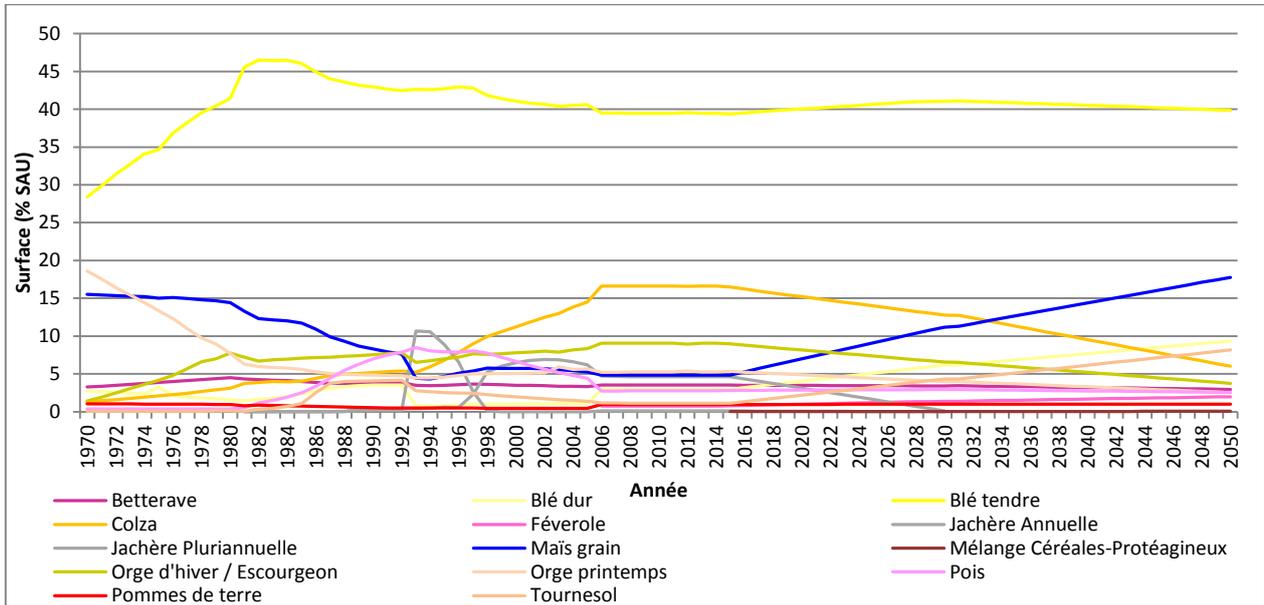


Figure 53 : Evolution des cultures de vente sur la Grande Région Agricole 7 dans le cadre du scénario A

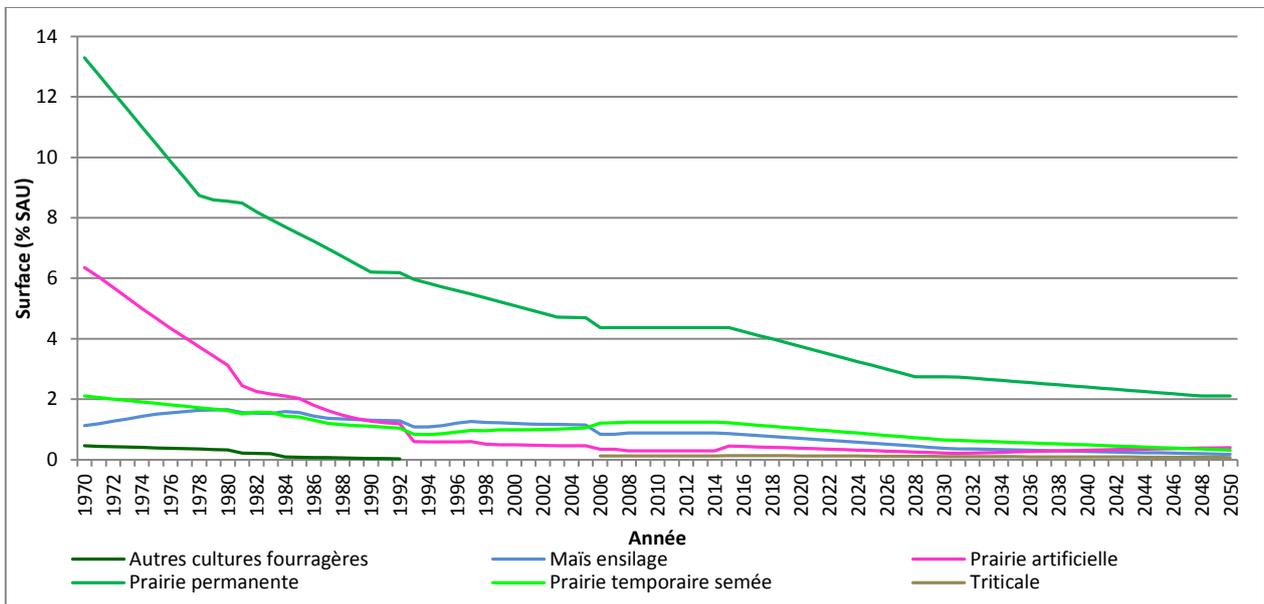


Figure 54 : Evolution des cultures fourragères sur la Grande Région Agricole 7 dans le cadre du scénario A

Scénario B

Grande région agricole 1

Les légumineuses (purs ou en mélanges, y compris la luzerne) représentent en 2050 une part non négligeable de la sole de la région. L'érosion des prairies permanentes s'est arrêtée. Le colza et l'orge d'hiver régressent.

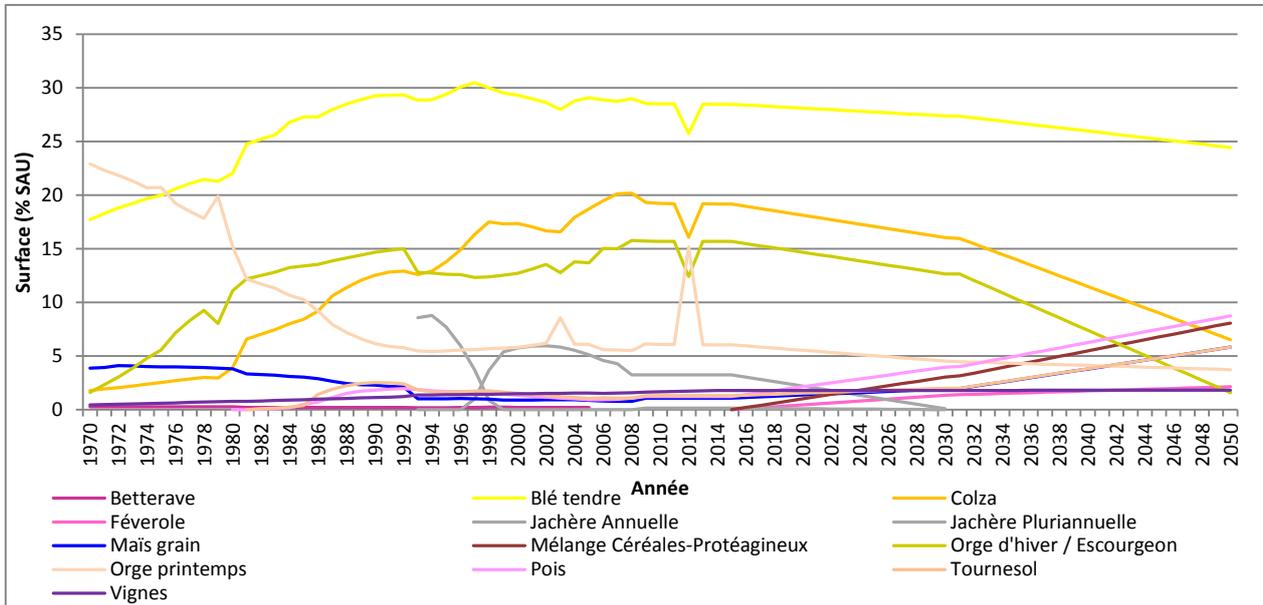


Figure 55 : Evolution des cultures de vente sur la Grande Région Agricole 1 dans le cadre du scénario B

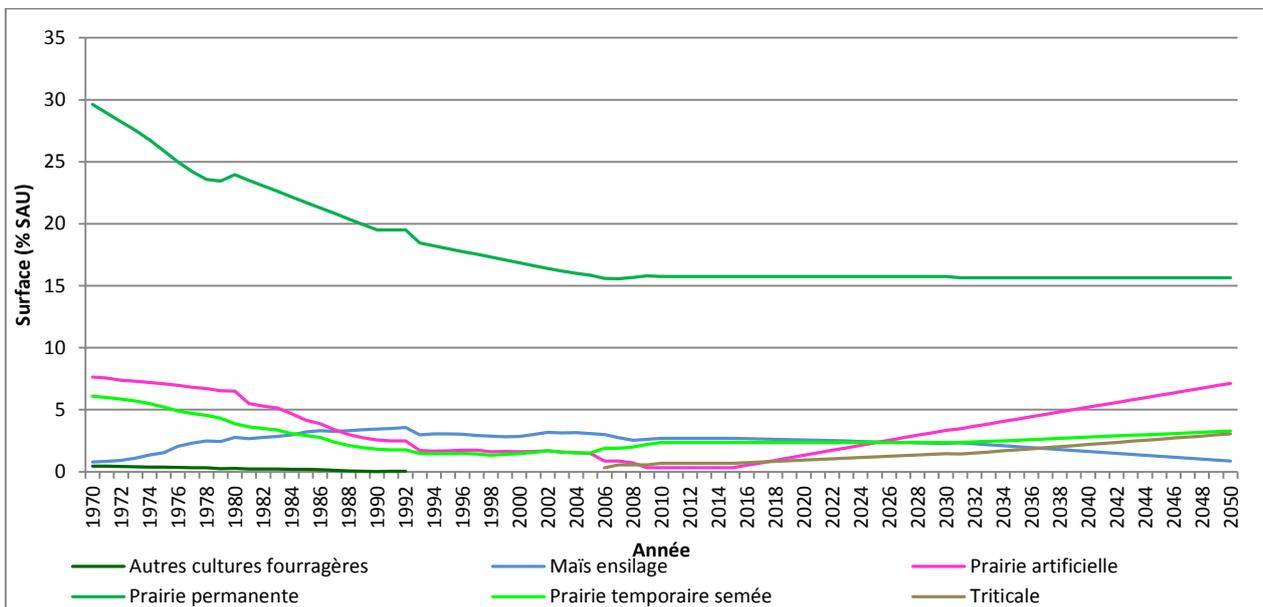


Figure 56 : Evolution des cultures fourragères sur la Grande Région Agricole 1 dans le cadre du scénario B

Grande région agricole 2

Cette grande région connaît de 2010 à 2050 une baisse des surfaces en herbe mais qui dominant encore largement le paysage en fin de période. Ces surfaces sont remplacées par des prairies artificielles en rotation avec des céréales et des protéagineux et parfois du tournesol ou du maïs.

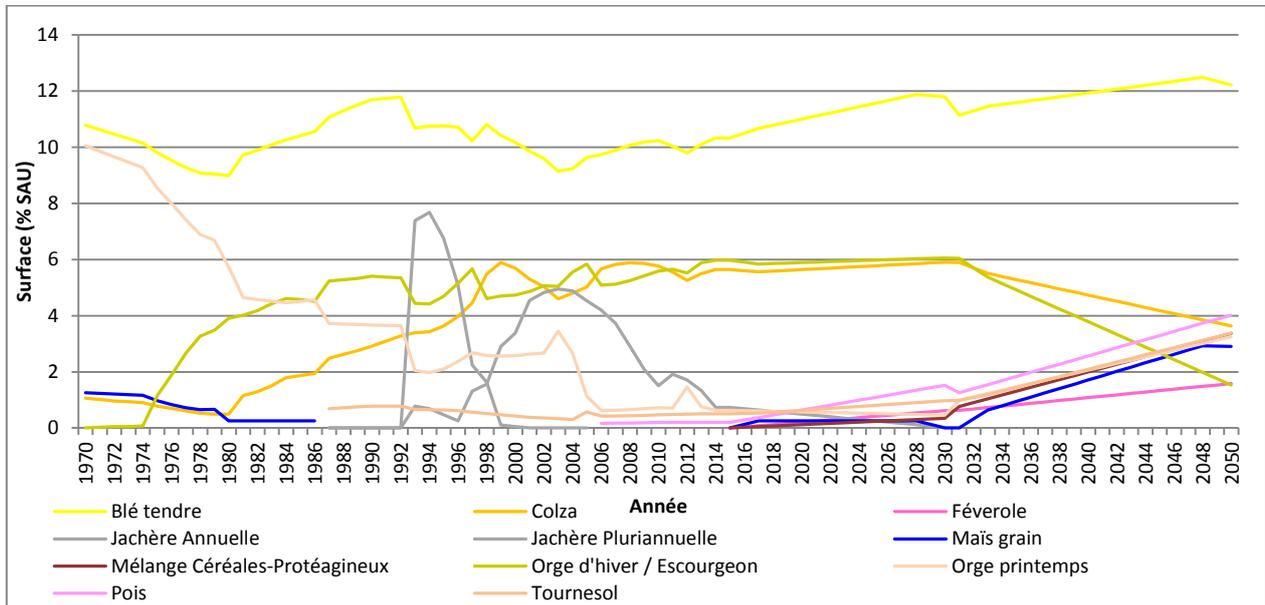


Figure 57 : Evolution des cultures de vente sur la Grande Région Agricole 2 dans le cadre du scénario B

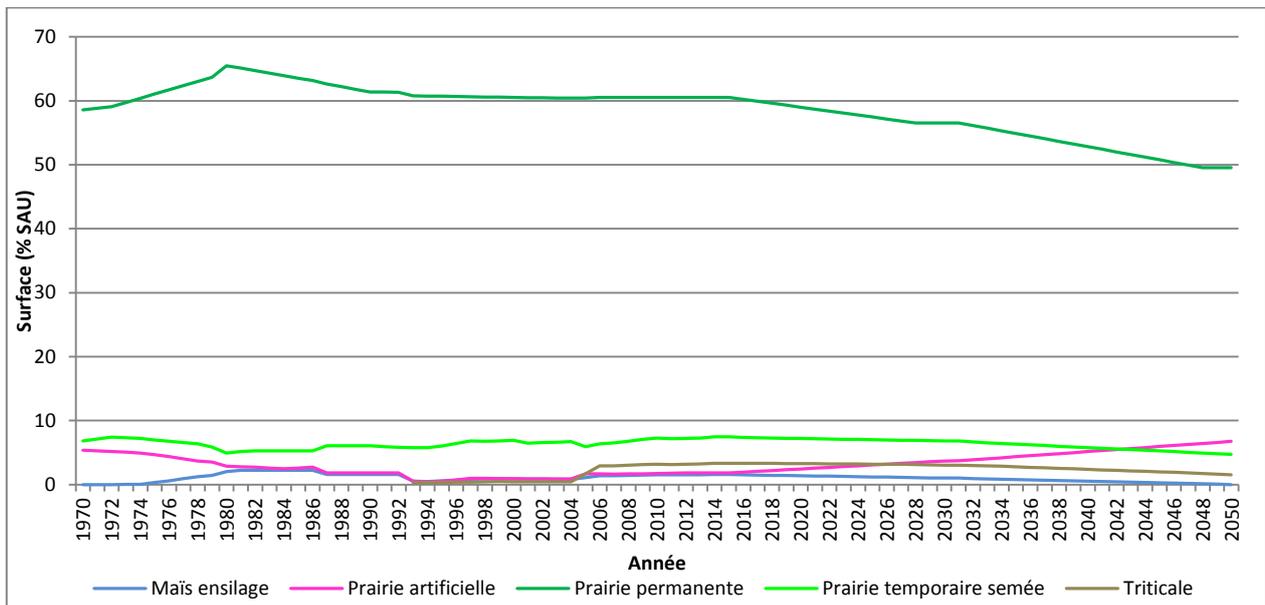


Figure 58 : Evolution des cultures fourragères sur la Grande Région Agricole 2 dans le cadre du scénario B

Grande région agricole 3

Les prairies permanentes de la GRA 3 reculent de quelques pourcents entre 2010 et 2050. Le colza et l'orge d'hiver diminuent au profit des protéagineux purs ou en mélange avec des céréales.

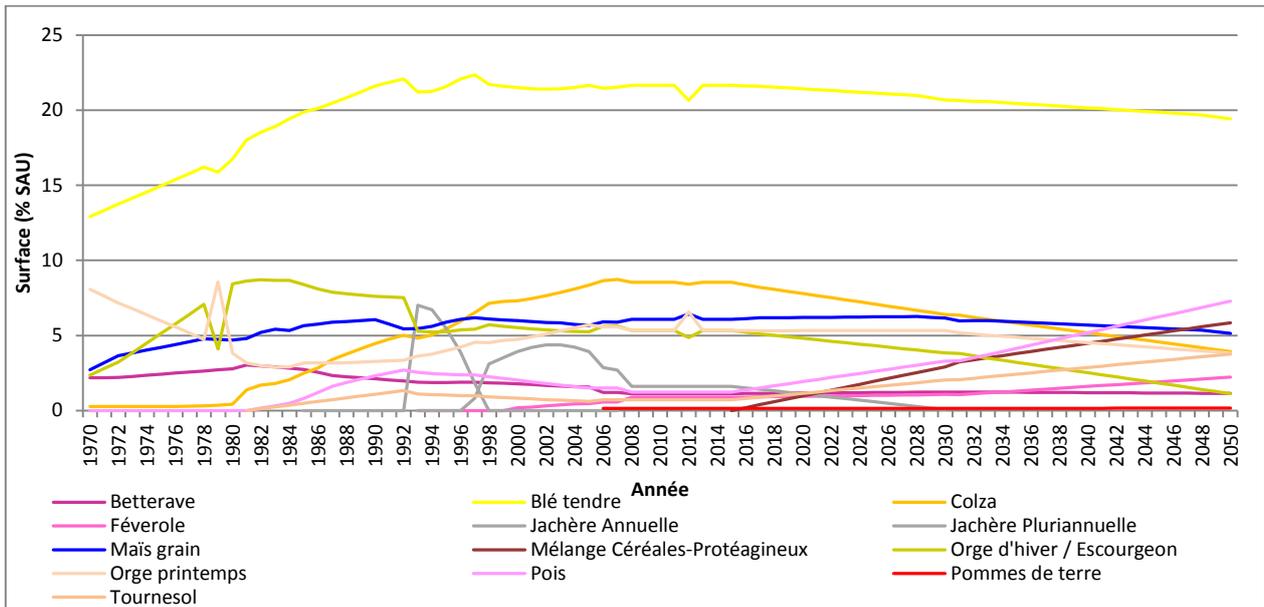


Figure 59 : Evolution des cultures de vente sur la Grande Région Agricole 3 dans le cadre du scénario B

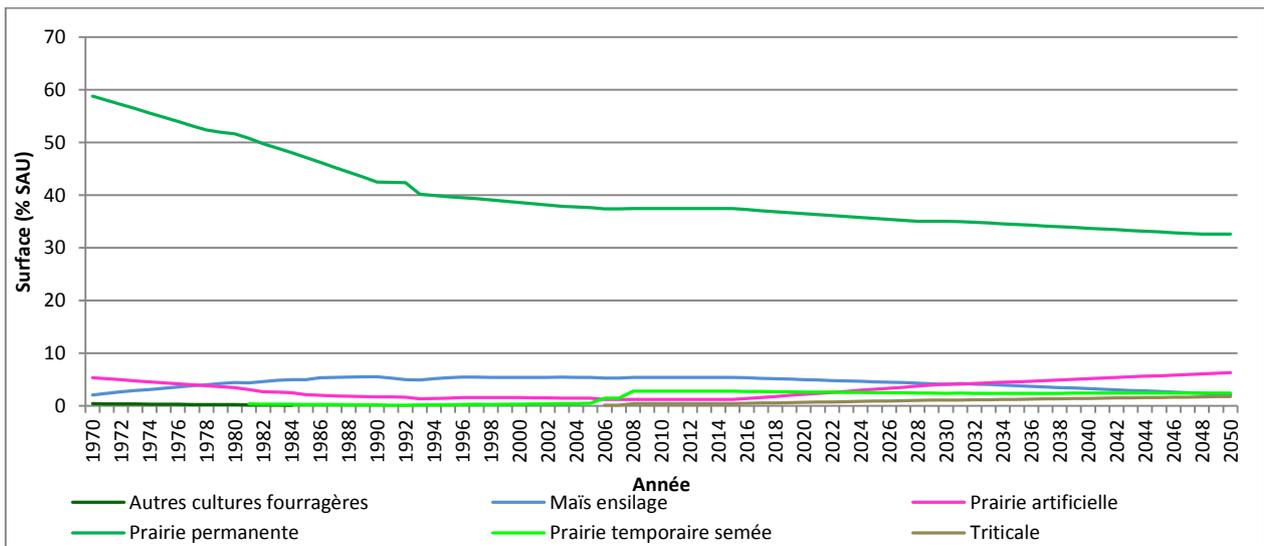


Figure 60 : Evolution des cultures fourragères sur la Grande Région Agricole 3 dans le cadre du scénario B

Grande région agricole 4

L'érosion rapide des prairies permanentes de la grande région s'est arrêtée au début des années 2010. Les surfaces en maïs fourrage disparaissent quasi totalement et sont remplacées par des prairies artificielles. Les cultures industrielles de type pomme de terre se développent régulièrement.

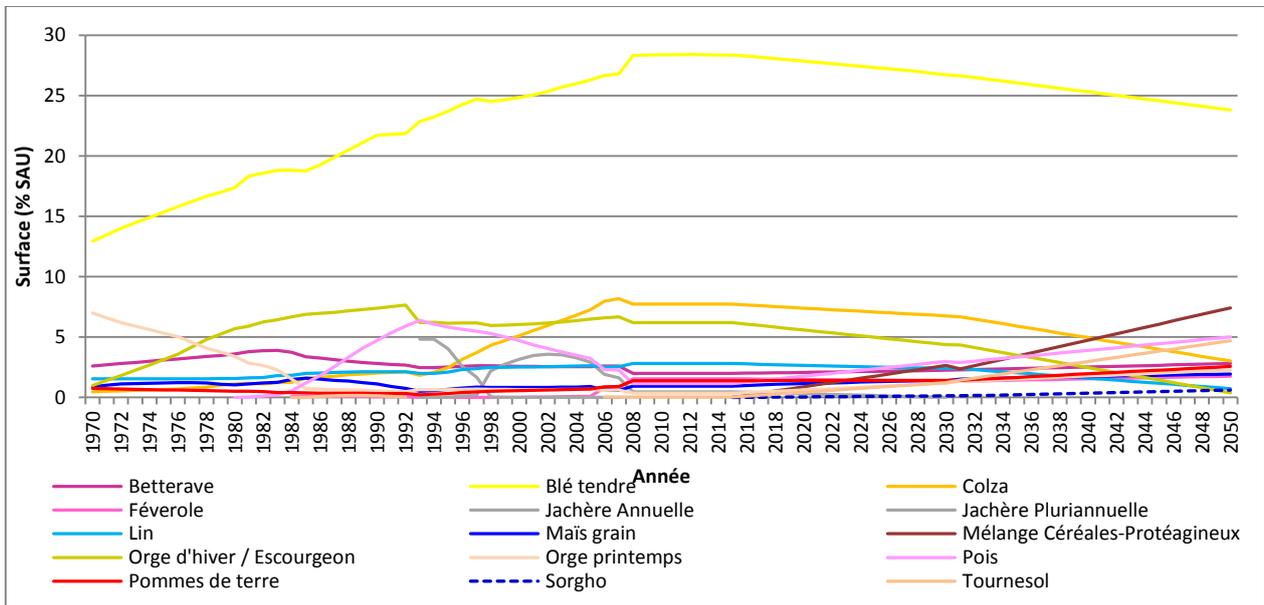


Figure 61 : Evolution des cultures de vente sur la Grande Région Agricole 4 dans le cadre du scénario B

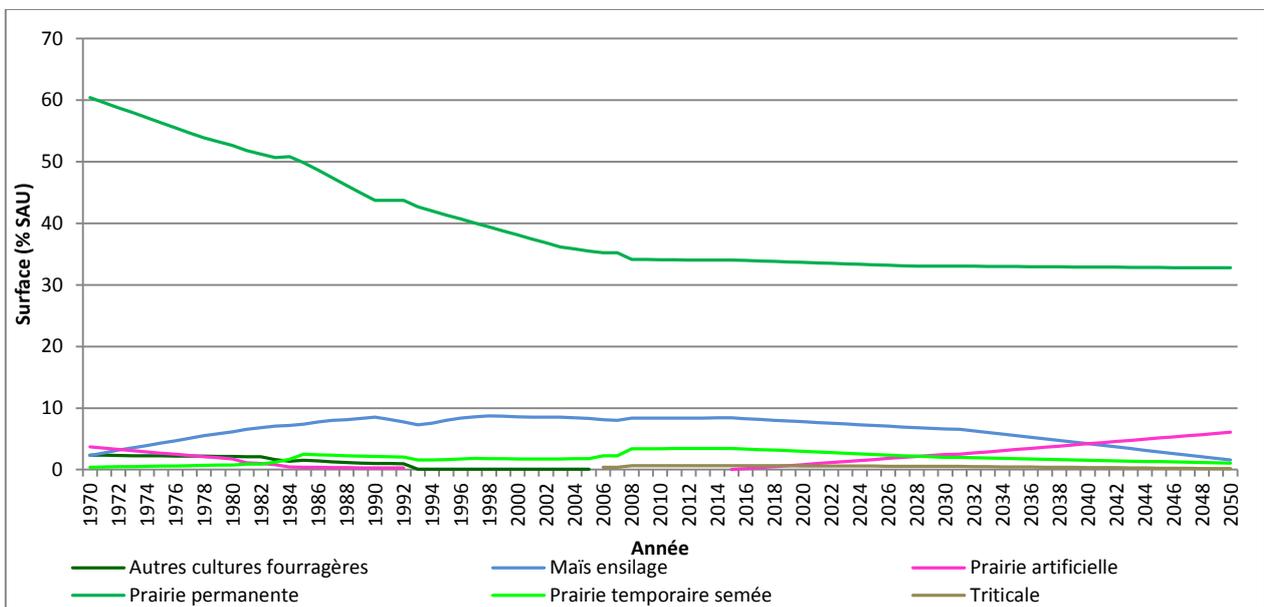


Figure 62 : Evolution des cultures fourragères sur la Grande Région Agricole 4 dans le cadre du scénario B

Grande région agricole 5

De même que la GRA 4, les prairies permanentes de la GRA 5 se maintiennent à un niveau stable depuis 2010. Le maïs fourrage disparaît quasi totalement des rations fourragères. Des cultures comme le tournesol, le sorgho ou le pois (pur ou en mélange avec des céréales) se développent.

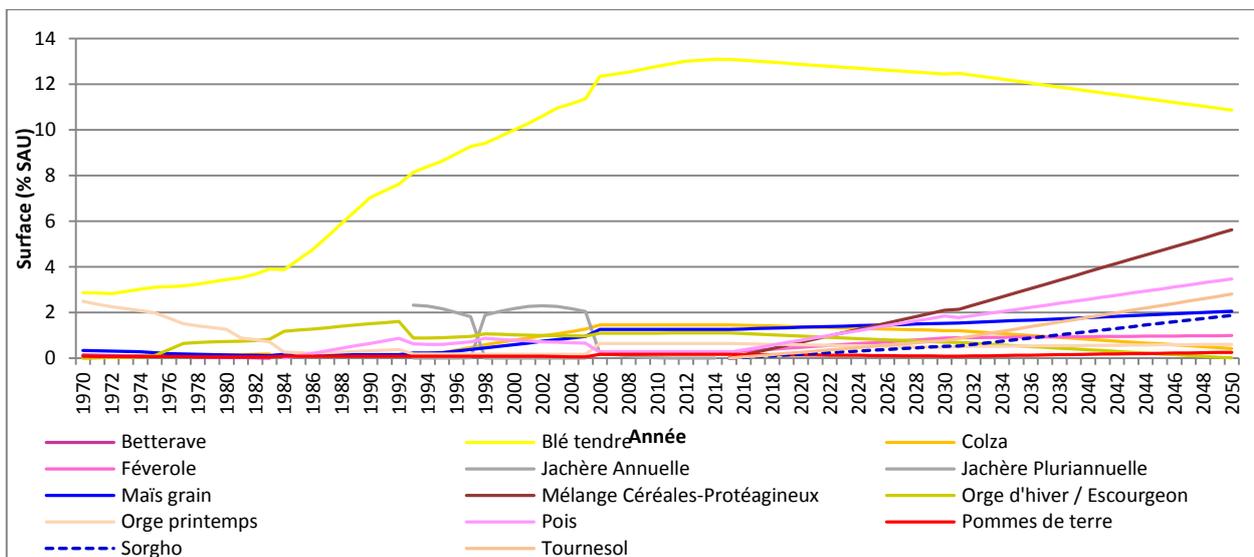


Figure 63 : Evolution des cultures de vente sur la Grande Région Agricole 5 dans le cadre du scénario B

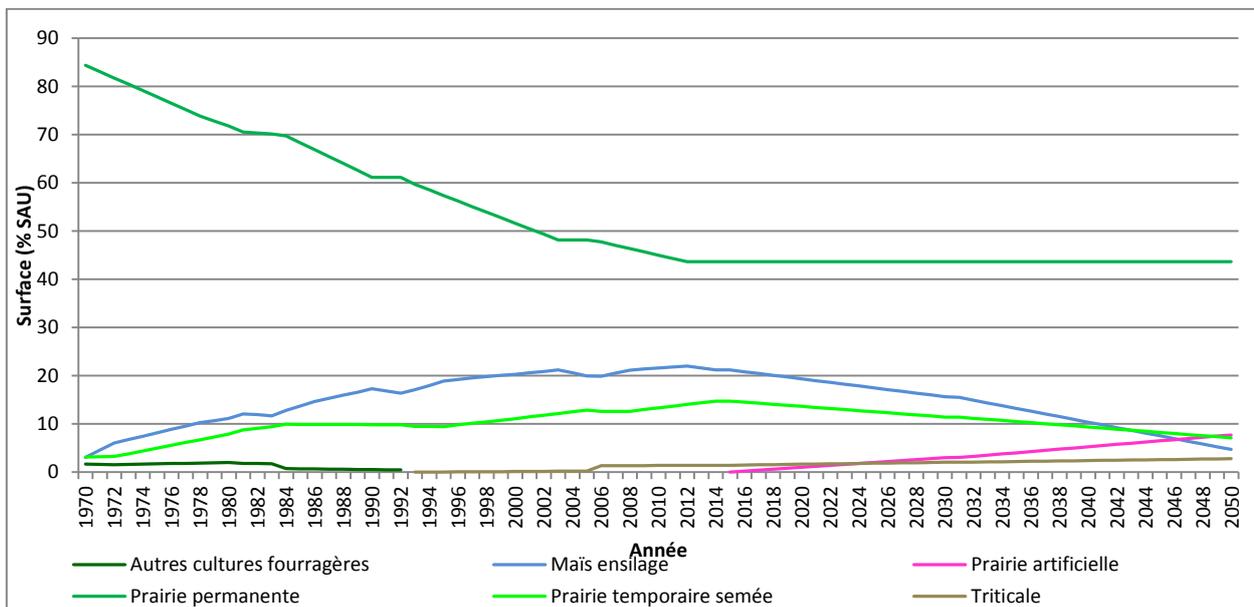


Figure 64 : Evolution des cultures fourragères sur la Grande Région Agricole 5 dans le cadre du scénario B

Grande région agricole 6

La betterave régresse légèrement de la sole de la région, de même que le maïs ou le colza. Ces cultures sont substituées par des légumineuses autonomes pour fixer l'azote atmosphérique. Les cultures industrielles type pomme de terre se développent. La luzerne connaît une forte progression, au-delà des valeurs historiques des années 1970. Les prairies permanentes regagnent du terrain dans cette région historiquement labourée.

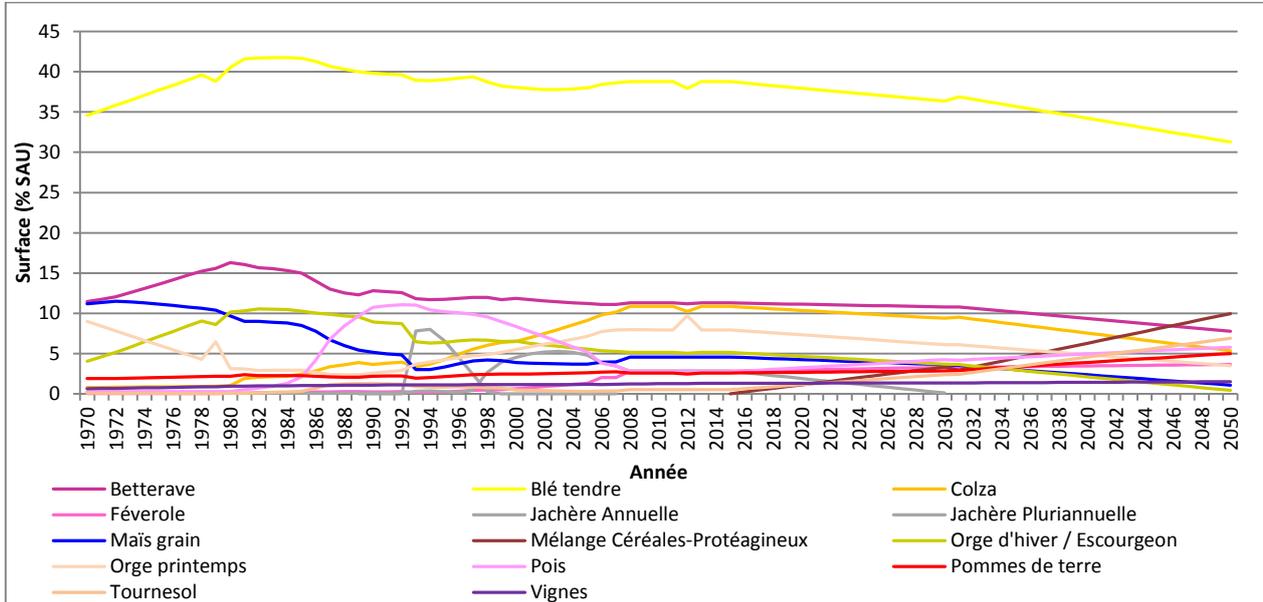


Figure 65 : Evolution des cultures de vente sur la Grande Région Agricole 6 dans le cadre du scénario B

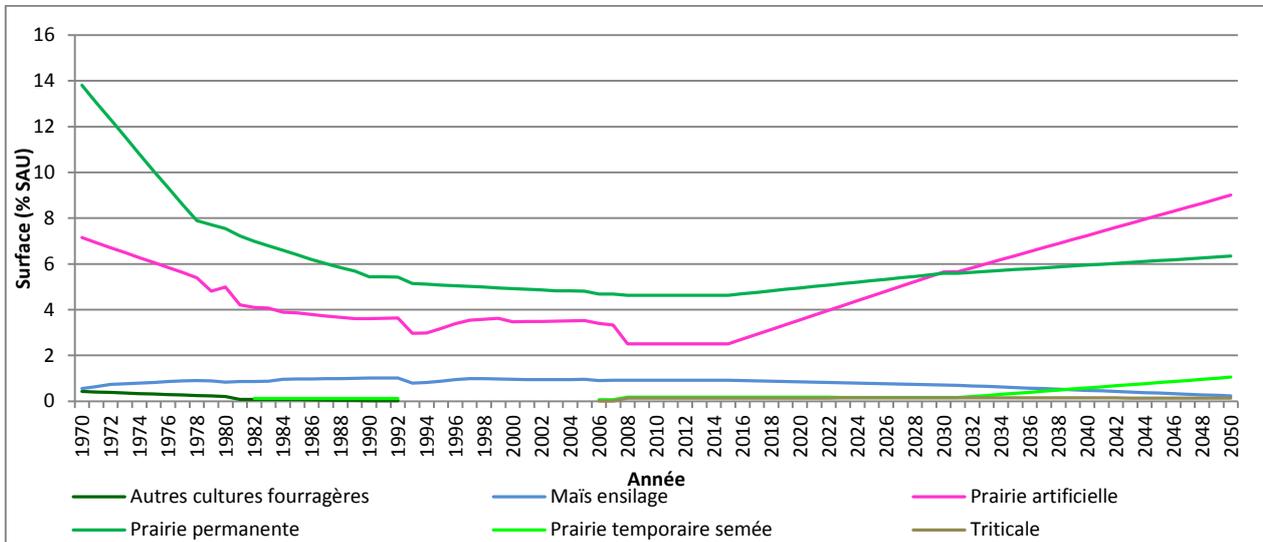


Figure 66 : Evolution des cultures fourragères sur la Grande Région Agricole 6 dans le cadre du scénario B

Grande région agricole 7

De même que la GRA 6, les prairies permanentes de la GRA 7 sont en légère augmentation. Les cultures d'hiver (orge, colza) régressent au profit de cultures de printemps type tournesol ou pois. Le sorgho progresse nettement et est préféré au maïs grain car moins sensible au stress hydrique d'été. Les cultures énergétiques comme le miscanthus se développent.

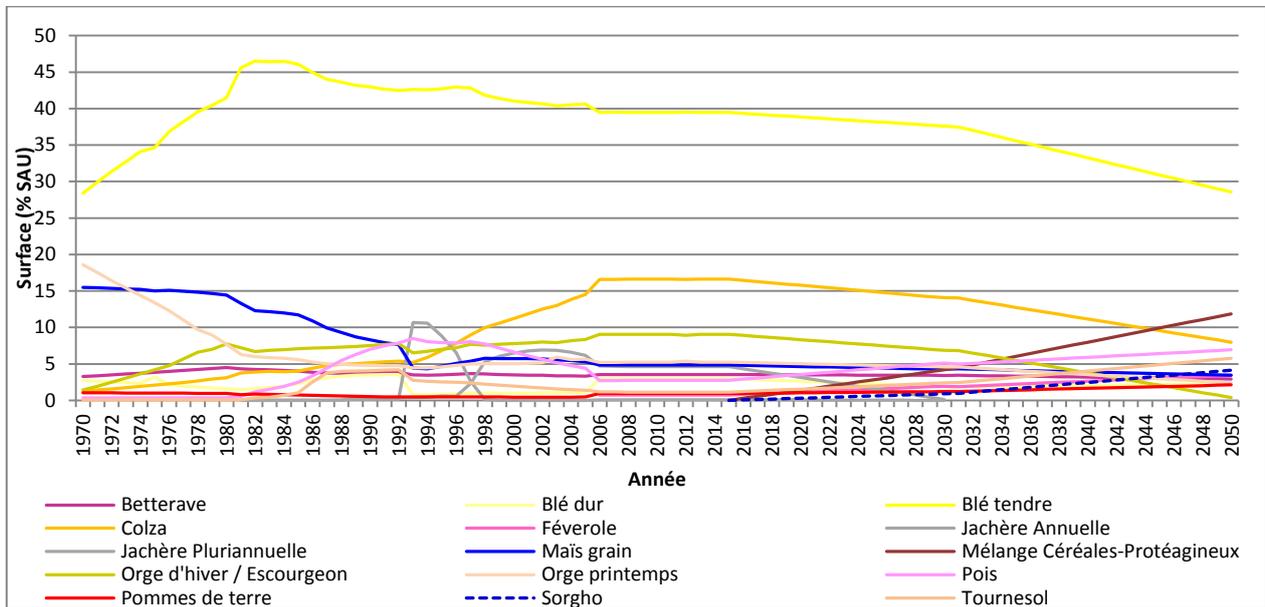


Figure 67 : Evolution des cultures de vente sur la Grande Région Agricole 7 dans le cadre du scénario B

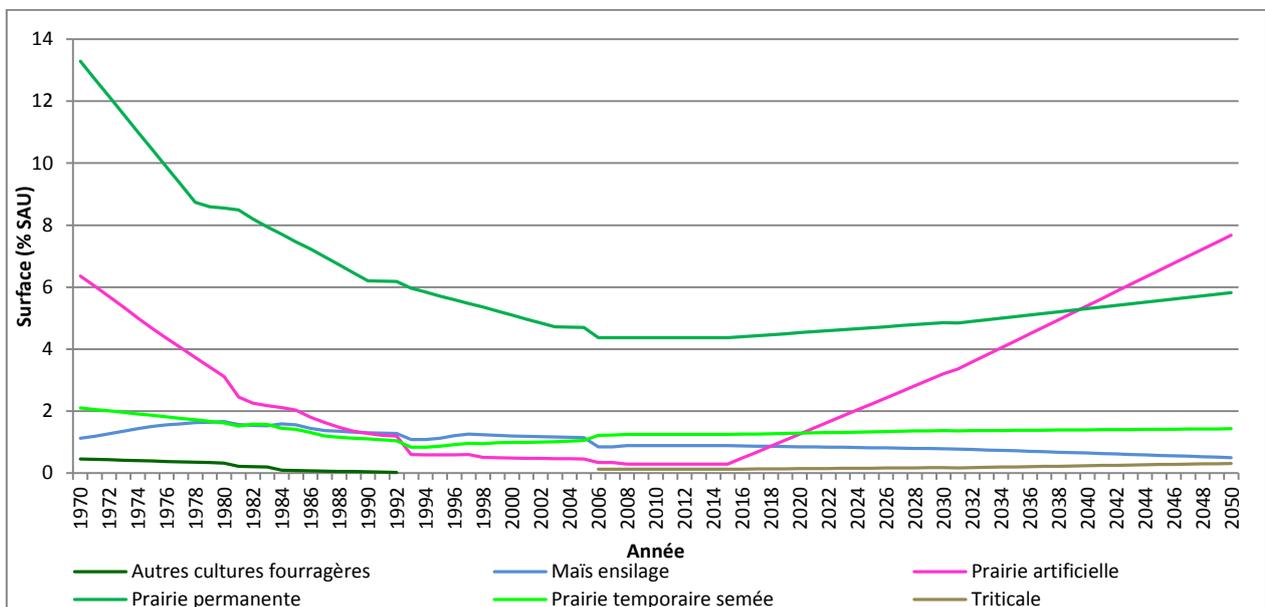


Figure 68 : Evolution des cultures fourragères sur la Grande Région Agricole 7 dans le cadre du scénario B

Annexe 5 : Bibliographie

- Agence de l'eau Seine-Normandie (2015). SDAGE 2016-2021 du bassin Seine-Normandie et des cours d'eau côtiers normands.
- Benoit, M., Fournier, T., & De La Torre, C. (2015). Impacts du changement climatique sur les calendriers agricoles : Exemples de cultures céréalières du Plateau Lorrain. AES, Vol5-1, p55-65.
- Benoît, M., C. Bornerand, C. Mignolet, E. Bienaimé, R. Cosserat-Mangeot, J.-F. Mari, and J.-M. Trommenschlager (2000). Etude rétrospective des dynamiques agricoles dans le bassin de la Seine depuis les années 70. Technical report, PIREN SEINE.
- Brunelle, T. (2015). Vers une prospective des impacts du changement climatique sur la sécurité alimentaire : les enseignements du 5ème rapport du GIEC. AES Vol 5-1, p13-22.
- Debaeke, P., Willaume, M., Casadebaig, P., & Nolot, J. (2008). Raisonner les systèmes de culture en fonction de la disponibilité en eau. Innovations Agronomiques 2, 19-36.
- Gallois N., Viennot P. (2018). Modélisation de la pollution diffuse d'origine agricole des grands aquifères du bassin Seine-Normandie : Actualisation des modélisations couplées STICS-MODCOU et modélisation de scénarios agricoles en contexte de changement climatique - Préparation de l'Etat des Lieux 2019, Rapport d'étude ARMINES, XXX p.
- Grall, J. et Coïc, N. , 2005 – Synthèse des méthodes d'évaluation de la qualité du benthos en milieu côtier.
- Grolleau, E., Bargeot, L., Chafchafi, A., Hardy, R., Doux, J., Beaudou, A., Le Martret, H., Lacassin, J.C., Fort, J.L., Falipou, P., Arrouays, D. (2004). Le système d'information national sur les sols: DONESOL et les outils associés. Etude et Gestion des Sols, 11 (3), 255-269.
- Habets, F., & Viennot, P. (2015). Évolutions constatées et prévisibles des principales composantes du climat ayant un effet sur l'agriculture avec un focus sur l'hydrologie. AES, Vol 5 - 1, p23-31.
- INRA, U. (2016). La structure de la base de données DoneSol [Vidéo]. Formations en ligne sur la saisie des données dans DONESOL-web. FRA : GISSOL.
- Lecomte, V., & Nolot, J. (2011). Place du tournesol dans le système de culture. Innovations Agronomiques 14, 59-76.
- Levavasseur, F., Martin, P., Bouty, C. Barbottin, A., Bretagnolle, V., Théron, O., Scheurer, O., Piskiewicz, N. (2016). RPG Explorer: A new tool to ease the analysis of agricultural landscape dynamics with the Land Parcel Identification System. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, v. 127, 541-552.
- Levrault, F. (2015). L'observation des effets agricoles du changement climatique en France : quelle contribution à l'adaptation ? AES, vol 5-1, p43-53.
- Levrault, F. (2015). L'observation des effets agricoles du changement climatique en France : quelle contribution à l'adaptation ? AES, vol 5-1.
- Poux, X., Aubers, P.-M. (2018). Une Europe agroécologique en 2050 une agriculture multifonctionnelle pour une alimentation saine. Enseignements d'une modélisation du système alimentaire européen. IDDRI Study. N°9. Sept 2018.

une agriculture multifonctionnelle

pour une alimentation saine

Puech, T., Schott, C., Mignolet, C. (2015). Modélisation de la pollution nitrique d'origine agricole des grands aquifères du bassin de Seine-Normandie à l'échelle des masses d'eau. Vol. 1. Évolution des systèmes de culture sur le bassin Seine- Normandie depuis les années 2000 : construction d'une base de données spatialisée sur les pratiques agricoles. <http://prodinra.inra.fr/record/341192>.

Shannon, C., Weaver, W., 1949. The mathematical theory of communication, University of Illinois Press, Urbana.

Schott, C., Mimet, A., Mignolet, C. (2010). Création d'une base de données sur les pratiques agricoles de Basse-Normandie de 1970 à 2006.

Viennot, P., Gallois, N., Puech, T. (2017). Note sur la détermination des volumes prélevables par irrigation généralisée en vue de la création de scénarios d'évolution des pratiques agricoles : Applications au bassin Seine-Normandie. ARMINES/MINES ParisTech - INRA, Rapport N°170908PVIE, Fontainebleau, France, Centre de Géosciences. URL : <https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-01616434>.

Viennot, P., Gallois, N. (2017). Modélisation de la pollution diffuse d'origine agricole des grands aquifères du bassin de Seine-Normandie : Scénarios d'évolution climatique - Impacts et incertitudes. ARMINES/MINES ParisTech, Rapport N°170621PVIE, Fontainebleau, France, Centre de Géosciences. URL : <https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-01616419>.