

IRSNINSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Utilisation de séries de mesures environnementales pour étudier la sensibilité de la contamination végétale aux rejets chroniques

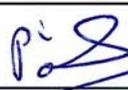
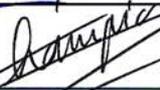
PROJET SENSIB

B. Briand, C. Mercat-Rommens

DIRECTION DE L'ENVIRONNEMENT
ET DE L'INTERVENTION
Service d'Etude et de Surveillance
de la Radioactivité
dans l'Environnement

DIRECTION DE L'ENVIRONNEMENT ET DE L'INTERVENTION

Service d'Etude et de Surveillance de la Radioactivité dans
l'Environnement - BP 35 - 78116 Le Vésinet Cedex

Demandeur					
Référence de la demande					
Numéro de la fiche programme					
<p>Utilisation de séries de mesures environnementales pour étudier la sensibilité de la contamination végétale aux rejets chroniques</p> <p>Laboratoire d'Etudes Radioécologiques en milieu Continental et Marin</p> <p>DEI/SESURE n° 2006 - 07</p>					
	Réservé à l'unité		Visas pour diffusion		
	Auteur(s)	Vérificateur*	Chef du SESURE	Directeur de la DEI	Directeur Général de l'IRSN
Noms	B. BRIAND	P. RENAUD	N. LEMAITRE	D. CHAMPION	J. REPUSSARD
Dates	24-02-06	02/05/06	12/06/06	26/06/06	
Signatures					

* rapport sous assurance de la qualité

HISTORIQUE DES MODIFICATIONS

Version	Date	Auteur	Pages ou paragraphes modifiés	Description ou commentaires
0	24.02.06	B. BRIAND		Emission initiale
1	21.04.06			Prise en compte des remarques de P. RENAUD
2	12.06.06			Prise en compte des remarques de N. LEMAITRE

Liste des participants

Nom	Organisme
B. BRIAND	Thésarde IRSN/DEI/SESURE/LERCM
C. MERCAT	IRSN/DEI/SESURE/LERCM

Liste de diffusion

Nom	Organisme
J. REPUSSARD	IRSN/DIR
M. BRIERE	IRSN/DIR
M. BOUVET	IRSN/DSDRE
J. LEWI	IRSN/DESTQ
MP BIGOT	IRSN/COM
F. SOULET	DESTQ/DISCT/CRIS
D. CHAMPION	DEI/DIR
D. BOULAUD	DEI/DIR
B. DUFER	DEI/DIR
JM. PERES	DEI/SARG
JC. GARIEL	DEI/SECRE
P. DUBIAU	DEI/SESUC
JP. MAIGNE	DEI/SIAR
MC. ROBE	DEI/STEME
P. CALMON	DEI/SECRE/LME
B. DESCAMPS	DEI/SESURE/LESE
P. CUENDET	DEI/SESURE/LVRE
P. RENAUD	DEI/SESURE/LERCM

RESUME

Ce travail consiste en l'estimation de trois paramètres radioécologiques intervenant dans la modélisation phénoménologique de la contamination des végétaux (rapport de captation, facteur de transfert racinaire et constante de décroissance de la biodisponibilité du radionucléide dans le sol). L'objectif est d'obtenir des informations, si possible régionalisées, sur les intervalles et les distributions de ces paramètres. Cette étude est réalisée à partir de différents jeux de données disponibles, en particulier, à partir de mesures de divers radionucléides effectuées en France sur des légumes-feuilles sur la période 1960-1980 durant les retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires. L'équation de transfert de la contamination radioactive vers les végétaux est ajustée à partir de divers jeux de données. Dans l'ensemble, les différents cas étudiés mettent en évidence une mauvaise qualité de l'ajustement. Ainsi, même si la plupart des valeurs estimées pour les différents paramètres de cette équation sont cohérentes avec la littérature, elles ne peuvent pas être utilisées pour proposer des informations régionalisées.

ABSTRACT

This study consists in the assessment of three radioecological parameters involved in the phenomenological modeling of the plant contamination (interception capacity of the vegetables, root transfer and effective period in soils). The aim is to obtain information about these parameters (if possible regionalized information): range and probability distribution. This study is based on various data sets available, in particular, from long records of radioactivity measurements carried out in France over the period 1960-1980 on leafy vegetables (related to the atmospheric tests of nuclear weapons). The plant contamination equation is fitted from various data sets. As a whole, the different cases studied highlight a bad goodness of fit. Thus, even if the majority of the estimated values for modeling parameters are consistent with literature, they cannot be used to propose regionalized value for radioecological parameters.

MOTS-CLES

Biostatistique, sensibilité radioécologique (SENSIB), légume-feuille, mesure, modélisation.

SOMMAIRE

1 INTRODUCTION.....	3
2 LES DIFFERENTES COMPOSANTES DE L'EQUATION DE LA CONTAMINATION DES VEGETAUX ET LES DONNEES ASSOCIEES	5
2.1 LES DONNEES DISPONIBLES.....	6
2.1.1 Mesures des activités massiques	6
2.1.2 Activité déposée	10
2.2 LES AUTRES ENTREES DE L'EQUATION.....	12
2.2.1 Les paramètres radioécologiques et radiophysiques	12
2.2.1.1 Les paramètres fixés	12
2.2.1.2 Les paramètres à estimer	13
2.2.2 Les paramètres agronomiques.....	13
2.3 LA METHODE D'ESTIMATION	15
3 TRAITEMENT DES SERIES DE DONNEES RELATIVES AUX RADIONUCLEIDES A VIE COURTE : ESTIMATION DU RAPPORT DE CAPTATION	17
3.1 CONTEXTE ET OBJECTIF	17
3.2 PREMIERE ESTIMATION DU RAPPORT DE CAPTATION R_c	17
3.3 ETUDE DES POINTS SUSPECTS	20
3.4 DEUXIEME ESTIMATION DU RAPPORT DE CAPTATION	21
3.5 ESTIMATION DU RAPPORT DE CAPTATION EN UTILISANT LES SERIES DE DONNEES SUPPLEMENTAIRES SUR LE RENDEMENT CULTURAL DES BETTES ET DES POIREAUX.....	23
3.6 BILAN	23
4 TRAITEMENT DES SERIES DE DONNEES RELATIVES AUX RADIONUCLEIDES A VIE LONGUE : ESTIMATION DE TROIS PARAMETRES RADIOECOLOGIQUES DE L'EQUATION DE LA CONTAMINATION DES VEGETAUX.....	25
4.1 CONTEXTE ET OBJECTIF.....	25
4.2 ESTIMATION EN CONSIDERANT UN DEPOT TOTAL (DEPOT SEC ET DEPOT HUMIDE CONFONDUS)...	25
4.2.1 Equation de la contamination des végétaux et méthode d'estimation.....	25
4.2.2 Résultats des estimations : cohérence globale avec la bibliographie	27
4.2.3 Résultats des estimations : mauvaise qualité des ajustements.....	31
4.2.4 Estimation à partir des séries de données supplémentaires sur le rendement culturel.....	32
4.3 TRAVAUX EFFECTUES EN DISTINGUANT LE DEPOT SEC DU DEPOT HUMIDE.....	32
4.4 BILAN	36
5 SYNTHESE ET CONCLUSIONS	37
6 LISTE DES REFERENCES.....	39
7 LISTE DES ANNEXES	41
8 LISTE DES TABLEAUX	42
9 LISTE DES FIGURES	43

1 INTRODUCTION

Cette étude est le résultat de la première partie d'un travail de thèse consacrée à l'*étude des facteurs naturels ou anthropiques susceptibles d'augmenter ou de réduire les conséquences d'un rejet radioactif dans un environnement agricole*. Elle a pour objectif de caractériser les différents facteurs de sensibilité du milieu agricole vis-à-vis d'un rejet radioactif. Elle s'inscrit dans le cadre du projet Sensibilité Radioécologique, SENSIB, (Mercat-Rommens & Renaud, 2002), (Mercat-Rommens & Renaud, 2003).

La première partie de la thèse consiste à réaliser les deux premières étapes du projet SENSIB dans le cadre du volet agricole du projet : identification des facteurs de sensibilité et caractérisation de leurs gammes de valeur. Afin d'obtenir ces informations, les paramètres des équations modélisant la contamination des différents produits de la chaîne alimentaire pour des rejets chroniques vont être analysés. Le traitement statistique des résultats de mesures d'activité effectuées dans l'environnement est proposé pour renseigner les principaux paramètres de transfert aux différents produits de la chaîne alimentaire. Les autres entrées du modèle qui ne peuvent pas être étudiées par cette méthode, mais dont les valeurs sont nécessaires à son utilisation, sont issues de la bibliographie. L'objectif est d'obtenir des estimations régionales des principaux paramètres de transfert et, par le biais de ces valeurs, des renseignements (si possibles régionalisés) sur ces paramètres : intervalle de variation et/ou distribution. Ces informations pourraient alors être utilisées dans la deuxième partie de la thèse, afin de déterminer la contribution ou le « poids » de chaque facteur (ou combinaison de facteurs) dans la sensibilité du milieu étudié.

Le travail d'estimation réalisé vise à caractériser différents paramètres radioécologiques de l'équation de la contamination des végétaux (légume-feuille) : le rapport de captation, le facteur de transfert racinaire et la constante de décroissance de la biodisponibilité du radionucléide dans le sol. Cette étude est réalisée à partir de mesures de radioactivité effectuées en France, sur divers légumes-feuilles, par l'IRSN, sur la période 1960-1980 durant les retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires. Une première exploitation de ces données a été réalisée (Vray 2002). Des valeurs régionales des principaux paramètres du transfert aux légumes-feuilles ont été recherchées (rapport de captation pour une période biologique et un temps de croissance donné, facteur de transfert racinaire et période de disparition du radionucléide dans le sol). Ces travaux ont été réalisés à partir de résultats de mesures de ^{90}Sr dans les salades et les poireaux entre 1961 et 1980. Cette étude, basée sur l'estimation des paramètres, est reprise en utilisant des techniques statistiques plus performantes, en travaillant sur d'autres radionucléides que le ^{90}Sr (^{137}Cs et divers radionucléides à vie courte : $^{95}\text{Nb}+^{95}\text{Zr}$, $^{144}\text{Ce}+^{144}\text{Pr}$, ^{141}Ce , $^{106}\text{Ru}+^{106}\text{Rh}$ et ^{103}Ru) et d'autres légumes-feuilles (bette, chou et chou-fleur).

La première partie du rapport présente les différentes composantes de la modélisation de la contamination des végétaux ainsi que les jeux de données retenus pour effectuer les estimations. Dans la deuxième partie du rapport, le rapport de captation est étudié seul à partir des séries de données relatives aux radionucléides à vie courte. La troisième partie du rapport consiste en l'estimation de trois paramètres radioécologiques (rapport de captation, facteur de transfert racinaire et constante de décroissance de la biodisponibilité du radionucléide dans le sol) de l'équation de la contamination des végétaux grâce aux résultats de mesures relatifs aux radionucléides à vie longue. Enfin, la conclusion synthétise les divers résultats obtenus lors de ces étapes d'estimation.

2 LES DIFFERENTES COMPOSANTES DE L'ÉQUATION DE LA CONTAMINATION DES VÉGÉTAUX ET LES DONNÉES ASSOCIÉES

La modélisation de la contamination des végétaux repose sur une équation de calcul de l'activité massique ($Bq.kg^{-1}$ frais) d'un végétal suite à un dépôt continu sur un pas de temps donné. Selon (Vray, 2002), cette expression est voisine de celle utilisée dans la plupart des modèles opérationnels de calcul de l'impact d'un rejet chronique, notamment FOCON (Rommens et al., 1999), mais également ABRICOT (Santucci, 1995). Elle correspond également à l'intégration de l'expression de la contamination des végétaux suite à un rejet aigu figurant dans ASTRAL (Renaud et al., 1997) ou ECOSYS (Müllet & Pröhl, 1993). L'objectif de ce travail n'est pas de discuter la pertinence de cette modélisation mais de la confronter au mieux avec les résultats de mesures environnementales disponibles.

Cette équation se décompose en deux parties : la première partie calcule l'activité du végétal par transfert foliaire et la deuxième partie détermine la concentration dans le végétal suite au transfert racinaire. L'expression de cette équation est la suivante :

$$C_{r,v}(t_d) = \underbrace{\frac{R_c}{R_{dt}} \frac{1 - e^{-(\lambda_b + \lambda_r)T_c}}{\lambda_b + \lambda_r}}_{\text{transfert foliaire}} \sum_{i=t_d-\alpha+1}^{t_d} \frac{D_{\Delta_i}}{T_c} + \underbrace{\frac{FT_r}{\mu h} \left(\sum_{i=t_1}^{t_d-1} D_{\Delta_i} e^{-(\lambda_s + \lambda_r) \sum_{j=i+1}^{t_d} \Delta_j} + D_{\Delta_{t_d}} \right)}_{\text{transfert racinaire}}$$

Avec :

R_c (sans dimension) : rapport de captation,

R_{dt} ($kg.m^{-2}$) : rendement cultural,

λ_b (j^{-1}) : constante de décroissance biomécanique du radionucléide pour le végétal,

λ_r (j^{-1}) : constante de décroissance physique du radionucléide,

T_c (j) : temps de croissance du végétal ou durée de phase végétative,

D_{Δ_i} (Bq par intervalle de temps) : activité déposée durant l'intervalle de temps Δ_i ,

Δ_i : intervalle de temps de l'étude,

FT_r (kg de sol sec par kg de végétal frais) : facteur de transfert racinaire,

h (m) : hauteur de l'horizon racinaire,

μ (kg de sol sec par m^3) : masse volumique du sol (sec),

λ_s (j^{-1}) : constante de décroissance de la biodisponibilité du radionucléide dans le sol. Cette constante prend en compte l'ensemble des phénomènes de décroissance écologique (migration en profondeur, érosion, fixation irréversible aux particules minérales, ...) mais ne prend pas en compte la décroissance radioactive.

Dans ce chapitre, la sortie ou réponse du modèle (activité massique), les diverses entrées de l'équation (activité déposée, paramètres radioécologiques et agronomiques) ainsi que les différents jeux de données disponibles pour estimer les paramètres radioécologiques sont présentés.

2.1 Les données disponibles

2.1.1 Mesures des activités massiques

L'équation calcule la contamination d'un végétal v par un radionucléide r à la date t_d , notée $C_{v,r}(t_d)$ ($Bq.kg^{-1}$ frais). Les calculs sont effectués en supposant le végétal à maturité (prêt à être consommé).

Les séries de mesures à disposition proviennent des rapports trimestriels produits par l'IPSN entre 1961 et 1980. Le contenu de ces rapports est stocké dans la base de données SYLVESTRE. Il s'agit de mesures de radioactivité mensuelles effectuées sur divers végétaux. Les différentes régions françaises dans lesquelles ces prélèvements ont été effectués sont présentées sur la Figure 1. Cette figure montre que ces lieux de prélèvement que l'on appelle « régions » dans la suite du rapport sont en fait des regroupements de départements qui ne correspondent pas exactement à la définition des régions administratives françaises.



Figure 1 : Régions ayant donné lieu à des prélèvements (Vray, 2002)

Ces mesures sont anciennes et certaines caractéristiques de prélèvement sont mal renseignées. Les lieux précis sont très rarement indiqués, seule la « région » est identifiée. De plus, les dates de prélèvement sont imprécises : uniquement le mois et l'année sont connus. Il a été choisi d'affecter l'ensemble des résultats de mesures au 28 de chaque mois (Vray, 2002).

Les radionucléides et les végétaux sélectionnés pour réaliser cette étude sont ceux présentant le plus grand nombre de mesures disponibles. Deux grands groupes de

radionucléides sont considérés : les radionucléides à vie courte ($^{95}\text{Nb}+^{95}\text{Zr}$, $^{144}\text{Ce}+^{144}\text{Pr}$, ^{141}Ce , $^{106}\text{Ru}+^{106}\text{Rh}$ et ^{103}Ru) mesurés en région Languedoc et les radionucléides à vie longue (ou moyennement longue) (^{90}Sr et ^{137}Cs) mesurés dans diverses régions françaises. Les végétaux étudiés sont les légumes-feuilles et les périodes d'études ont été choisies en fonction des séries de données disponibles sur les dépôts afin que les périodes d'études correspondent à celles où les dépôts des divers radionucléides ont pu être reconstruits (Renaud et al., 2003). Le nombre de données à disposition pour ces deux grands groupes est présenté dans les Tableaux 1 et 2.

LANGUEDOC	$^{95}\text{Nb}+^{95}\text{Zr}$	$^{144}\text{Ce}+^{144}\text{Pr}$	^{141}Ce	$^{106}\text{Ru}+^{106}\text{Rh}$	^{103}Ru
<i>Bette</i>	35	33	25	15	16
<i>Chou</i>	27	19	-	-	-
<i>Chou-fleur</i>	20	12	15	-	-
<i>Poireau</i>	35	22	12	13	-
<i>Salade</i>	100	87	50	50	38
TOTAL	217	173	77	63	54

Tableau 1 : Données disponibles relatives aux radionucléides à vie courte

	Chou		Chou-fleur		Poireau		Salade	
	^{90}Sr	^{137}Cs	^{90}Sr	^{137}Cs	^{90}Sr	^{137}Cs	^{90}Sr	^{137}Cs
1 BOURGOGNE LYONNAIS	47	-	-	-	91	-	73	-
2 BRETAGNE	-	-	-	-	153	-	153	26
3 COTE D'AZUR	-	-	-	-	104	-	108	15
4 GARONNE	-	-	-	-	151	29	148	43
5 LANGUEDOC	-	36	-	31	116	44	116	193
6 LORRAINE	-	-	-	-	97	15	61	18
7 NORD	-	-	-	-	135	-	135	21
8 PARIS	-	-	-	-	150	14	152	20
9 PROVENCE	42	122	26	41	168	131	206	203
10 ROUSSILLON	-	-	-	-	15	-	102	16
11 VAL DE LOIRE	-	-	-	-	50	-	88	-
TOTAL	89	158	26	72	1230	233	1342	555

Tableau 2 : Données disponibles relatives aux radionucléides à vie longue

Pour ces 7 radionucléides, la base de données SYLVESTRE regroupe environ 8000 résultats de mesures effectuées dans différentes régions françaises et sur divers végétaux pour la période d'étude considérée. Les données sélectionnées dans cette étude correspondent à environ la moitié de l'ensemble des résultats disponibles (4289 prélèvements).

Afin de visualiser les données disponibles, des figures représentant les résultats de mesures de radioactivité en fonction des dates de prélèvement ont été réalisées pour chaque radionucléide (Figures 2 à 4). Les figures relatives aux radionucléides à vie courte sont

présentées par type de radionucléide, en distinguant les espèces de légumes-feuilles (Cf. Figure 2).

La variabilité des résultats de mesures est importante :

- variabilité inter-espèces, d'un légume à l'autre les concentrations sont très variables : par exemple, en janvier 1972, la concentration de $^{106}\text{Ru} + ^{106}\text{Rh}$ dans les végétaux s'étale sur 3 ordres de grandeur,
- variabilité intra-espèces, on retrouve aussi de la variabilité au sein d'une même espèce : pour les salades, les activités de $^{95}\text{Zr} + ^{95}\text{Nb}$ mesurées en janvier 1972 s'étalent sur un ordre de grandeur.

Globalement, les légumes présentant les activités les plus fortes ($> 10 \text{ Bq.kg}^{-1}$) sont les bettes et les salades.

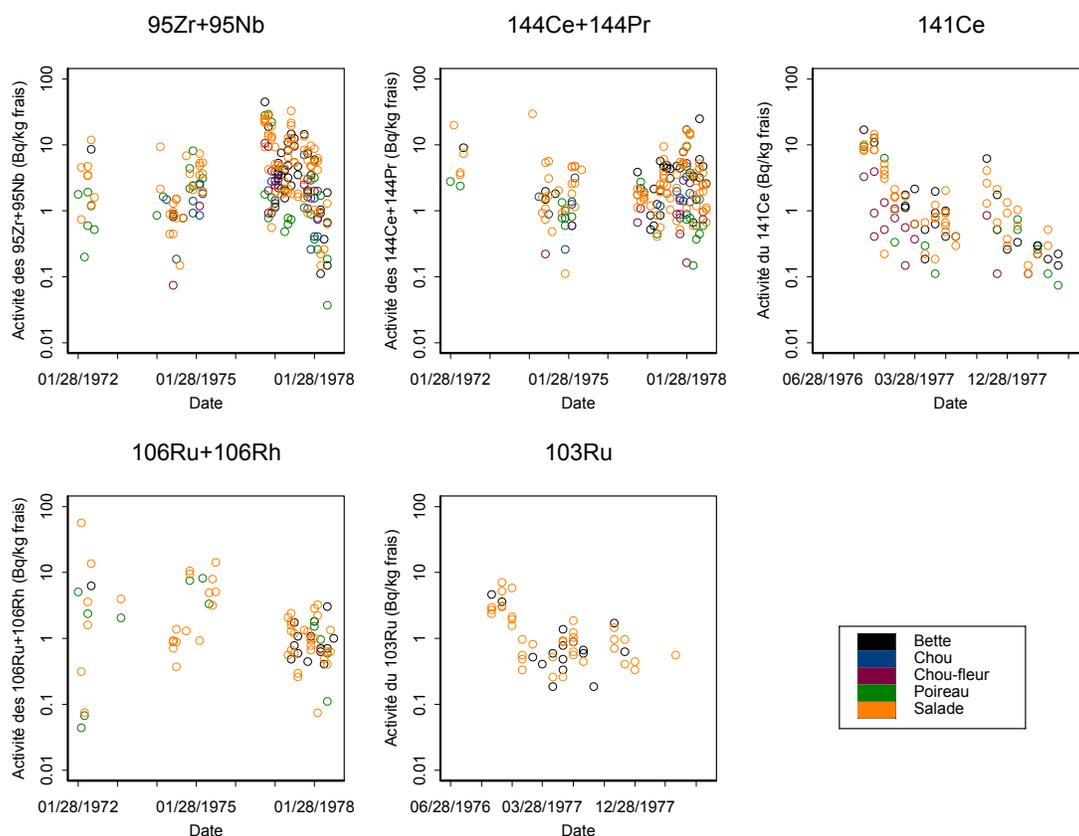


Figure 2 : Mesures des divers radionucléides à vie courte en fonction de leur date de prélèvement

Les représentations graphiques des données disponibles relatives aux radionucléides à vie longue sont effectuées pour chacun des deux radionucléides, par légumes-feuilles, en distinguant les différentes régions prélevées (Cf. Figures 3 et 4).

Comme sur les graphes relatifs aux radionucléides à vie courte, on peut observer une grande variabilité des concentrations intra-espèces. Dans ce cas, la région d'étude semble être un élément permettant de réduire la variabilité : le premier graphique de la Figure 3 fait

apparaître, de façon globale, de plus fortes activités du ^{90}Sr dans les poireaux prélevés en régions Garonne, Bretagne et Bourgogne Lyonnais, par rapport à ceux prélevés en région Languedoc.

En comparant les deux premiers graphes des Figures 3 et 4, on remarque aussi que les concentrations du ^{137}Cs dans les salades et les poireaux sont beaucoup plus variables que celles du ^{90}Sr .

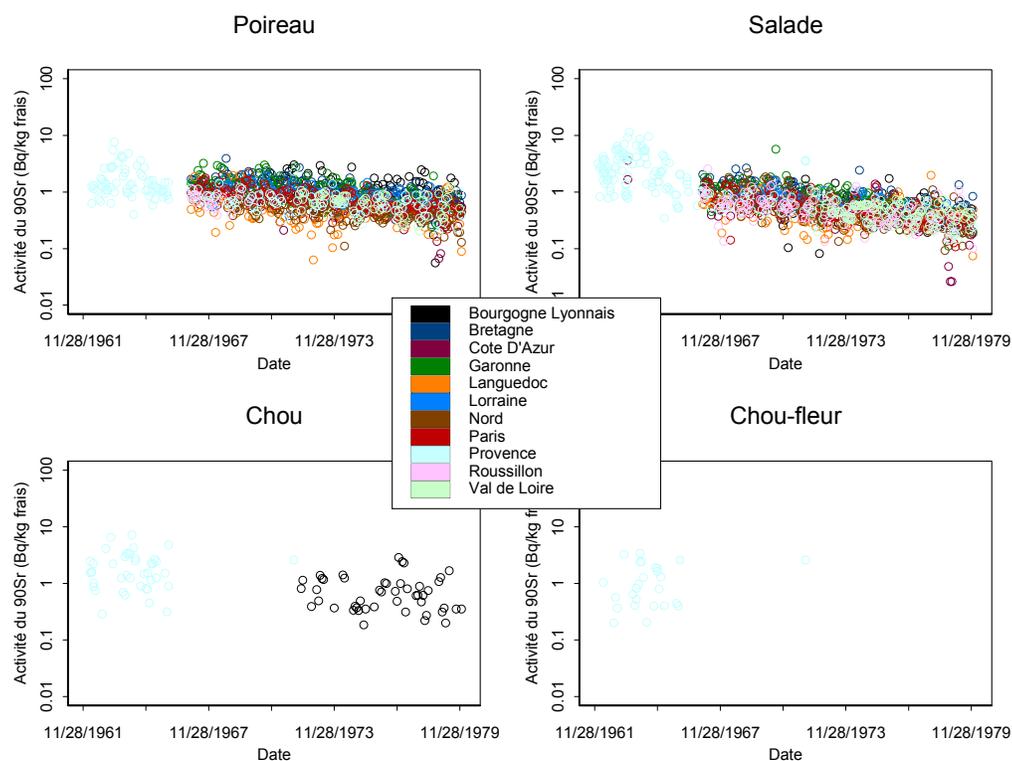


Figure 3 : Représentation graphique des différents résultats de mesures de ^{90}Sr disponibles

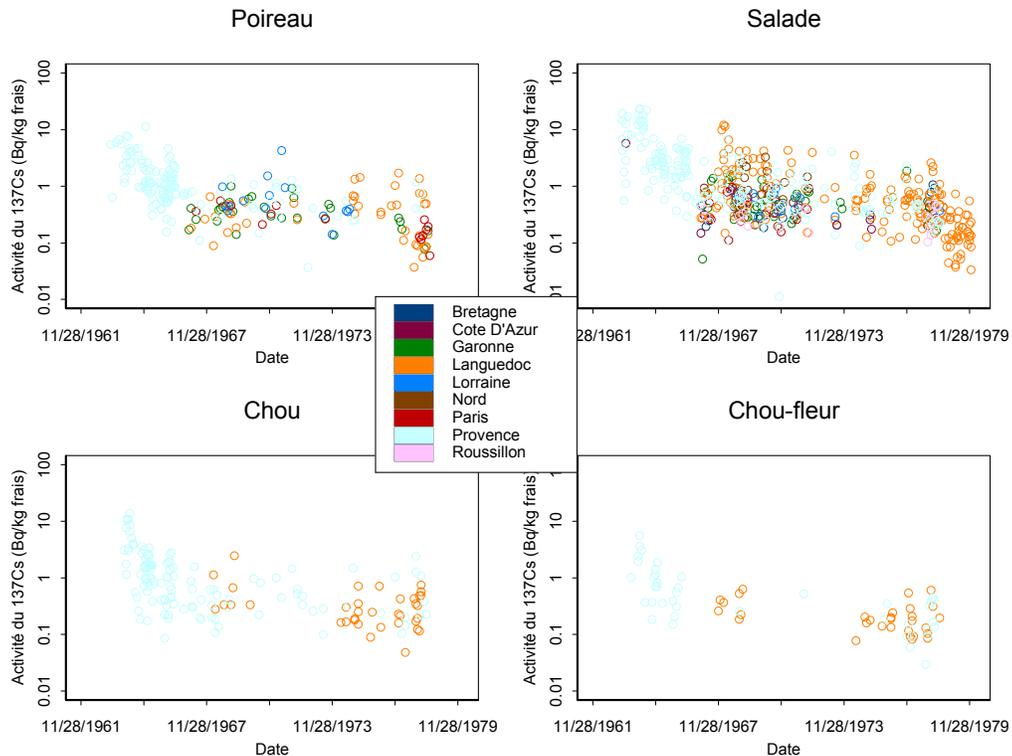


Figure 4 : Représentation graphique des différents résultats de mesures de ^{137}Cs disponibles

2.1.2 Activité déposée

Il s'agit de l'activité déposée ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$) durant un intervalle de temps donné. Les données présentées dans ce paragraphe reposent exclusivement sur des travaux réalisés dans (Vray, 2002) et (Vray & Renaud, 2004). Pour l'ensemble des radionucléides étudiés, des séries de données d'activité déposée sont disponibles au pas de temps mensuel car les données utilisées pour effectuer les reconstructions ont été traitées à cette échelle de temps : sur la période novembre 1961-février 1980 pour le ^{90}Sr et sur la période juin 1961-juillet 1978 pour les autres radionucléides.

Grâce aux mesures de l'activité dans l'air et l'eau de pluie effectuées au pas de temps mensuel par le Service Central de Protection Contre les Rayonnements Ionisants (SCPRI) sur la période 1960-1980 (à Fontenay-aux-Roses puis au Vésinet), le dépôt mensuel en région parisienne peut être estimé par la formule suivante, utilisée dans la plupart des modèles radioécologiques :

$$D_{\Delta_{t_i}} = D_{\Delta_{t_i}}^{\text{sec}} + D_{\Delta_{t_i}}^{\text{hum}} = A_{\Delta_{t_i}}^{\text{air}} V_d + A_{\Delta_{t_i}}^{\text{eau}} H_{\text{eau}} \quad - 1 -$$

Avec :

$D_{\Delta_{t_i}}$ ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mois}^{-1}$) : dépôt mensuel total,

$D_{\Delta_{t_i}}^{\text{sec}}$ ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mois}^{-1}$) : dépôt mensuel par temps sec,

$D_{\Delta_{t_i}}^{\text{hum}}$ ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mois}^{-1}$) : dépôt mensuel par temps de pluie,

$A_{\Delta_i}^{air}$ ($Bq.m^{-3}$) : activité moyenne dans l'air durant le mois,

V_d ($m.mois^{-1}$) : vitesse de dépôt des aérosols radioactifs,

$A_{\Delta_i}^{eau}$ ($Bq.l^{-1}$) : activité moyenne dans l'eau de pluie durant le mois,

H_{eau} ($l.m^{-2}.mois^{-1}$) : hauteur mensuelle des précipitations.

Deux séries complètes de données sur l'activité dans l'air (en région parisienne) ont été constituées pour le $^{95}Zr+^{95}Nb$ et le ^{90}Sr (Vray et Renaud, 2004). Ces séries sont utilisées pour compléter les jeux de données relatifs aux radionucléides à vie courte (en utilisant les rapports d'activité [Radionucléide]/[$^{95}Zr+^{95}Nb$]) et la série de données relative au ^{137}Cs (en utilisant un rapport d'activité constant entre le ^{90}Sr et le ^{137}Cs , [^{137}Cs]/[^{90}Sr]=1,5 (Renaud et al., 2003)).

En ce qui concerne le dépôt humide, les séries de données ont été constituées à partir des données de l'activité dans l'eau de pluie et la hauteur de pluie. Dès que celles-ci étaient inconnues, le dépôt humide a été considéré égal à deux fois le dépôt sec (Renaud et al., 2003).

Au niveau régional, l'activité dans l'air et celle dans l'eau de pluie sont considérées partout identiques à celles mesurées en région parisienne. Ainsi, à l'échelle de la France le dépôt sec est le même, et le dépôt humide varie uniquement en fonction des hauteurs de pluies régionales (Vray, 2002). Il est calculé en multipliant l'activité dans l'eau de pluie en région parisienne (quotient du dépôt humide en région parisienne par la hauteur de pluie dans cette même région) par la hauteur de pluie régionale. Les données pluviométriques utilisées pour réaliser ces calculs sont issues du CD-rom de météo France, « Le Climat de la France ». Il s'agit de moyennes mensuelles établies sur 30 ans (1961-1990) pour 113 villes françaises. Ainsi, des moyennes mensuelles régionales des hauteurs de pluies ont pu être calculées à partir des données issues de différentes stations (Cf. Annexe A).

Pour le ^{90}Sr et le ^{137}Cs , les dépôts qui précèdent la période d'étude ont été pris en compte. Les dépôts de ^{90}Sr consécutifs des retombées atmosphériques des années antérieures ont été pris en compte à un pas de temps annuel en utilisant les données de l'UNSCEAR (1982) (Vray 2002). La valeur affectée à l'année 1957 représente l'ensemble des dépôts antérieurs à cette date. Le Tableau 3 regroupe ces différentes données.

Année	Dépôt sur la période ($Bq.m^{-2}$)
1957	470,48
1958	164,11
1959	273,98
1960	68,32
1961 (janv-oct)	66,80

Tableau 3 : Dépôt de ^{90}Sr antérieur à la période d'étude

En utilisant le rapport $[^{137}\text{Cs}]/[^{90}\text{Sr}]=1,5$ (UNSCEAR, 2002), les dépôts antérieurs de ^{137}Cs ont été reconstruits, à partir des valeurs issues du Tableau 3.

Les séries de données temporelles disponibles pour réaliser les estimations sont les mesures de radioactivité effectuées dans les végétaux ainsi que les dépôts mensuels. Les autres composantes du modèle à savoir les caractéristiques agronomiques et radioécologiques ne sont pas connues pour chaque observation de la variable réponse (mesure de radioactivité dans un végétal) et doivent être renseignées par des recherches bibliographiques. C'est le cas des paramètres présentés dans le paragraphe suivant (T_c , R_{dt} , h , μ et λ_b). Un travail de recherche a donc été effectué afin de trouver les valeurs les plus adaptées pour réaliser les estimations.

2.2 Les autres entrées de l'équation

Afin d'optimiser le travail d'estimation des valeurs des paramètres, il est souhaitable de limiter le nombre de paramètres à estimer. Dans ce travail, nous avons donc choisi d'utiliser des valeurs génériques pour certains paramètres radioécologiques considérés comme a priori les moins sensibles à un effet de la région (décroissance biomécanique) et pour l'ensemble des paramètres agronomiques dont la variabilité régionale n'est pas l'objet de la présente étude.

2.2.1 Les paramètres radioécologiques et radiophysiques

2.2.1.1 Les paramètres fixés

- La constante de décroissance biomécanique du radionucléide pour le végétal notée λ_b (jours^{-1}).

Cette décroissance rend compte principalement de la dilution de l'activité lors de la croissance du végétal. Pour la plupart des radionucléides, la valeur générique affectée à cette constante est de $0,05 \text{ j}^{-1}$ (correspondant à une période d'environ 14 jours) (GRNC, 2001). Cette valeur, correspondant aux valeurs proposées dans les modèles FOCON (Rommens et al., 1999) et FARMLAND (Brown & Simmonds, 1995), a été choisie pour le présent travail.

- La constante de décroissance physique du radionucléide notée λ_p (j^{-1}).

Elle est fonction du radionucléide. Les valeurs associées à ce paramètre sont regroupées dans le Tableau 4.

	⁹⁵ Nb+ ⁹⁵ Zr	¹⁴⁴ Ce+ ¹⁴⁴ Pr	¹⁴¹ Ce	¹⁰⁶ Ru+ ¹⁰⁶ Rh	¹⁰³ Ru	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs
λ_p (j^{-1})	1,08E-02	2,44E-03	2,13E-02	1,90E-03	1,80E-02	6,80E-05	6,30E-05
T_p (an)	0,18	0,78	0,09	1,00	0,11	27,93	30,14

Tableau 4 : Constante de décroissance radioactive et période associée

2.2.1.2 Les paramètres à estimer

- Le rapport de captation noté R_c (sans dimension).

Il désigne la fraction du dépôt exprimé en $Bq.m^{-2}$, qui est interceptée par la masse foliaire des végétaux se trouvant à la surface du sol. Il s'exprime donc par un rapport d'activité sans dimension. Dans le cas d'un dépôt continu durant toute la phase de croissance du végétal, le rapport de captation peut prendre différentes valeurs possibles car il évolue dans le temps, depuis la sortie hors du sol jusqu'à la maturité du végétal. Partant de l'hypothèse que les observations (mesures de radioactivité sur un végétal) ont été effectuées sur le végétal à maturité, c'est une valeur moyenne du rapport de captation qui sera estimée.

- Le facteur de transfert racinaire noté FT_r (kg de sol sec par kg de végétal frais).

Il permet de quantifier la fraction d'activité présente dans un sol qu'un végétal prélève par ses racines. Il s'exprime par le rapport entre l'activité d'un radionucléide dans les parties consommables d'un végétal et l'activité dans le sol.

- La constante de décroissance de la biodisponibilité du radionucléide dans le sol notée λ_s (jours⁻¹).

Cette quantité intègre les phénomènes de migrations horizontale et verticale ainsi que le vieillissement du radionucléide (fixation irréversible sur les particules minérales) qui diminue sa biodisponibilité pour les racines des plantes.

2.2.2 Les paramètres agronomiques

- Le temps de croissance du végétal ou durée de la phase végétative noté T_c (jours).

Des recherches bibliographiques ont été effectuées afin de renseigner les temps de croissance de l'ensemble des légumes-feuilles étudiés (Cf. Annexe B). Pour chaque légume, une valeur moyenne a été calculée à partir des différentes données trouvées dans la littérature (Cf. Tableau 5).

Pour le poireau, des données régionales sont disponibles dans (Le Bohec J. et al., 1993) (Cf. Annexe C). Ainsi, pour certaines régions de l'étude des valeurs moyennes ont pu être calculées (à partir des différentes données proposées pour les périodes de production). Seules les régions Garonne, Languedoc, Lorraine et Roussillon n'ont pas pu être renseignées, c'est alors la valeur moyenne calculée à partir de l'Annexe C qui a été utilisée (Cf. Tableau 6).

	<i>Tc (mois)</i>
Bette	6
Chou	5
Chou-fleur	5
Salade	3

Tableau 5 : Valeurs sélectionnées pour les temps de croissance des différents légumes-feuilles étudiés

	<i>Tc (mois)</i>
1 Bourgogne Lyonnais	4
2 Bretagne	8
3 Cote d'Azur	6
4 Garonne	6
5 Languedoc	6
6 Lorraine	6
7 Nord	5
8 Paris	6
9 Provence	6
10 Roussillon	6
11 Val de Loire	6

Tableau 6 : Valeurs sélectionnées pour le temps de croissance du poireau dans les différentes régions étudiées

- Le rendement cultural noté R_{dt} ($kg.m^{-2}$).

Comme pour le temps de croissance, le rendement cultural est une donnée agronomique très variable suivant l'espèce et pour laquelle le regroupement en catégories (légumes-feuilles, légumes-racines,...) ne permet pas de réduire la variabilité. De la même manière que pour le temps de croissance, des recherches bibliographiques ont été effectuées (Cf. Annexe D). Les valeurs retenues sont présentées dans le Tableau 7.

	<i>Rendement ($kg.m^{-2}$)</i>
Bette	3,0
Chou	2,0
Chou-fleur	1,5
Poireau	3,0
Salade	2,5

Tableau 7 : Valeurs sélectionnées pour les rendements des différents légumes-feuilles étudiés

D'autres données sont aussi disponibles dans les cahiers de la statistique agricole d'Agreste. Ces rapports regroupent les données de rendements de différents légumes par département et à partir de l'année 1960. N'étant pas saisies dans une base de données, ces données sont assez longues à acquérir : il faut prendre en compte les différentes variétés et modes de

culture pour chaque département de la zone d'étude. Ainsi, pour l'instant, des chroniques complètes ont été informatisées uniquement pour le poireau et la bette (Cf. Annexe E). Dans la suite du rapport plusieurs estimations seront effectuées en fonction des deux séries de données disponibles sur les rendements du poireau et de la bette.

- La profondeur de labour h (m).

En comparant les différentes valeurs proposées pour les légumes-feuilles dans les différents modèles radioécologiques ECOSYS (Müllet & Pröhl, 1993), FARMLAND (Brown & Simmonds, 1995) et AIEA (IAEA, 1994), la valeur retenue est une valeur moyenne égale à 25 cm.

- La masse volumique du sol (sec) notée μ (kg de sol sec par m^3).

Cette quantité dépend du type de sol et de son degré de tassement. Ne connaissant pas ces caractéristiques pour chaque mesure, nous avons utilisé une valeur moyenne égale à $1410 \text{ kg sec.m}^{-3}$ issue de (GRNC, 2001). Dans (GRNC, 2001), ce paramètre a été étudié à partir de mesures issues de la base de données SYLVESTRE. Il a été déduit que la masse volumique suit une loi normale de moyenne $1410 \text{ kg sec.m}^{-3}$ et d'écart-type $356 \text{ kg sec.m}^{-3}$.

2.3 La méthode d'estimation

A partir de l'équation de la contamination des végétaux et des données disponibles pour l'activité massique et l'activité déposée, les trois paramètres radioécologiques (rapport de captation, facteur de transfert racinaire et constante de décroissance du radionucléide biodisponible dans le sol) vont être estimés.

L'équation de la contamination des végétaux peut s'écrire :

$$Y = f(X_1, \dots, X_p, a, b, c) + \varepsilon$$

où

Y est la variable réponse (activité ($Bq.kg^{-1}$ frais) du radionucléide r dans le végétal v),

X_1, \dots, X_p sont les variables explicatives,

a, b, c sont les paramètres inconnus à estimer,

ε l'erreur ou résidu (on le suppose additif).

Le type de fonction f est fixé dès le départ par la structure de l'équation de la contamination des végétaux. On verra dans la suite, que f est linéaire dans le cas d'un dépôt de radionucléide à vie courte (chapitre 3), et que f est non linéaire dans le cas d'une contamination par des radionucléides à vie longue (chapitre 4).

Notre travail consiste à estimer les valeurs des paramètres de la fonction f (rapport de captation dans un premier temps, puis rapport de captation, facteur de transfert racinaire et constante de décroissance de la biodisponibilité du radionucléide dans le sol) en supposant que l'erreur est additive. La procédure suit les étapes suivantes :

- choix de la méthode d'estimation, elle dépend de la structure du modèle étudié. Dans cette étude trois méthodes vont être utilisées : méthode des moindres carrés ordinaires, méthode des moindres carrés séparables et méthode de minimisation numérique,
- estimation des valeurs des paramètres par cette méthode,
- calcul des valeurs prédites par l'équation (activité massique dans les végétaux),
- confrontation aux données de la mesure afin de juger de la qualité de l'ajustement, et calcul du coefficient de détermination R^2 :

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

où

y_i : mesure i de la variable réponse,

\hat{y}_i : valeur prédite par l'équation,

\bar{y} : moyenne de la variable réponse.

Le coefficient de détermination peut s'interpréter comme la fraction de la variabilité totale des résultats de mesures expliquée par le modèle (l'équation),

- analyse statistique des résidus (différence entre valeurs mesurées et prédites) afin de vérifier si une éventuelle structure se dégage des résidus (histogrammes des résidus et représentations des résidus en fonction des valeurs prédites).

3 TRAITEMENT DES SERIES DE DONNEES RELATIVES AUX RADIONUCLÉIDES A VIE COURTE : ESTIMATION DU RAPPORT DE CAPTATION

3.1 Contexte et objectif

Les séries de mesures relatives aux radionucléides à vie courte sont particulièrement intéressantes car elles permettent de travailler sur un seul paramètre : le rapport de captation. En effet, en raison de leur courte période, ces radionucléides ne sont pas accumulés dans les sols et ne donnent pas lieu à un transfert racinaire. L'équation de la contamination des végétaux se restreint alors à la partie transfert foliaire.

Ainsi, en première analyse, le rapport de captation qui figure parmi les paramètres à régionaliser est étudié seul avec pour objectif de vérifier s'il peut être considéré comme indépendant du radionucléide et/ou du légume-feuille. Dans cette étape, on n'étudie donc pas l'effet région (seules des mesures de la région Languedoc sont traitées) mais on teste l'hypothèse classiquement utilisée d'indépendance du rapport de captation vis-à-vis du radionucléide afin de simplifier la suite du travail dans la prochaine étape d'estimation à partir des séries de données relatives aux radionucléides à vie longue.

3.2 Première estimation du rapport de captation R_c

L'équation permettant de calculer la concentration dans un végétal à la suite d'un dépôt de radionucléide (à vie courte) est la suivante :

$$C_{r,v}^f(t_d) = \frac{R_c}{R_{dt}} \frac{1 - e^{-(\lambda_b + \lambda_p)T_c}}{\lambda_b + \lambda_p} \sum_{i=t_d-a+1}^{t_d} \frac{D_{\Delta_i}}{T_c} \quad - 2 -$$

où $C_{r,v}^f(t_d)$ est l'activité du radionucléide r dans le végétal v à la date t_d due au transfert foliaire. Les différents paramètres apparaissant dans cette équation ont été présentés dans le paragraphe précédent.

Dans cette équation, le dépôt est moyenné sur le temps de croissance du végétal et il est supposé constant sur cet intervalle de temps.

Considérons le modèle linéaire suivant :

$$y_k = ax_k + \varepsilon_k \quad \text{pour } k = 1, \dots, n \quad - 3 -$$

et posons :

y_k : activité k du radionucléide r dans le végétal v ,

a : rapport de captation,

$$x_k = \left(\frac{1 - e^{-(\lambda_b + \lambda_p)T_c}}{R_{dt}(\lambda_b + \lambda_p)} \sum_{i=t_d-a+1}^{t_d} \frac{D_{\Delta_i}}{T_c} \right)_k,$$

ε_k : résidu.

Estimer le rapport de captation de l'équation 2 revient à estimer le paramètre a dans l'équation 3, (en considérant un échantillon de taille n). Ce modèle est linéaire et la méthode d'estimation choisie est celle des moindres carrés ordinaires (régression linéaire avec ordonnée à l'origine nulle). Ainsi, pour chaque couple (légume-feuille, radionucléide) étudié, une valeur du rapport de captation est estimée. Au total 19 estimations sont effectuées. Les différentes valeurs obtenues sont présentées dans le Tableau 8.

	⁹⁵ Nb+ ⁹⁵ Zr	¹⁴⁴ Ce+ ¹⁴⁴ Pr	¹⁴¹ Ce	¹⁰⁶ Ru+ ¹⁰⁶ Rh	¹⁰³ Ru
Bette	0,642	0,270	0,554	0,176	0,426
Chou	0,182	0,066	-	-	-
Chou-fleur	0,124	0,031	0,115	-	-
Poireau	0,364	0,143	0,674	0,368	-
Salade	0,504	0,125	0,523	0,152	0,395

Tableau 8 : Valeurs estimées du rapport de captation par la méthode des moindres carrés ordinaires

D'un légume et d'un radionucléide à l'autre, les valeurs du rapport de captation sont assez variables : on passe de 0,031 pour le couple (chou-fleur, ¹⁴⁴Ce+¹⁴⁴Pr) à 0,642 pour le couple (bette, ⁹⁵Zr+⁹⁵Nb). Malgré quelques estimations assez faibles, les valeurs sont globalement comprises dans les ordres de grandeur proposés dans la littérature (les valeurs proposées pour les légumes-feuilles pour la captation par temps sec étant de 0,3 dans FARMLAND (Brown, 1995), 0,33 dans ABRICOT (Santucci, 1995) et 0,5 dans FOCON (Rommens, 1999), et 0,1 pour la captation par temps humide dans FOCON (Rommens, 1999)).

Les estimations obtenues permettent alors de calculer, grâce à l'équation 2, des valeurs de concentration dans les végétaux et de les confronter aux valeurs observées. Le graphe des valeurs prédites en fonction des valeurs observées, le coefficient de détermination, ainsi que l'analyse graphique des résidus sont présentés sur la Figure 5 à titre d'exemple pour le couple (chou, ¹⁴⁴Ce+¹⁴⁴Pr). Pour les autres couples étudiés, les graphes peuvent être visualisés en Annexe F.

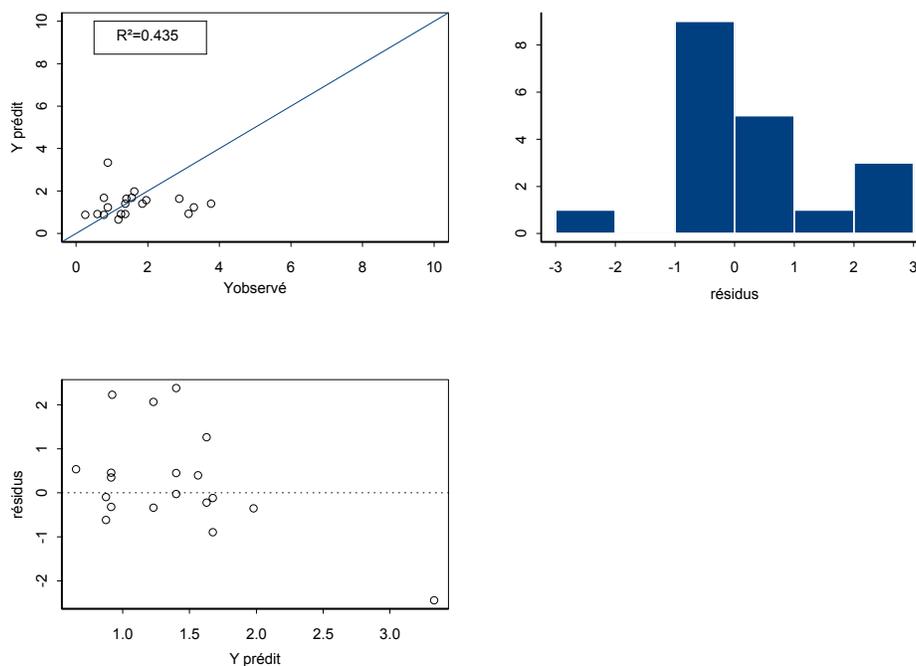


Figure 5 : Valeurs prédites en fonction des valeurs observées (en $Bq.kg^{-1}$ frais), histogramme des résidus et représentation des résidus en fonction des valeurs prédites pour le couple (chou, $^{144}Ce+^{144}Pr$)

Le premier graphe de la Figure 5 (confrontation des valeurs prédites aux valeurs observées) montre une mauvaise adéquation entre les mesures et l'équation utilisée car certaines valeurs prédites sont assez éloignées des valeurs observées. Cette constatation est identique pour l'ensemble des autres graphes présentés en Annexe F. Les différentes représentations des résidus en fonction des valeurs prédites montrent que globalement la variance des résidus est stable. L'examen des histogrammes des résidus fait apparaître, le plus souvent, qu'il y a plus de valeurs surestimées que sous-estimées. En particulier, les faibles valeurs de concentration sont surestimées, contrairement aux fortes qui sont sous-estimées.

La présence de certains « points isolés » pour les certains couples (Cf. Figure 6) conduit à s'interroger sur la validité de certaines mesures. En effet, il est possible que ces points isolés soient aberrants. Afin de pouvoir les éliminer ou éventuellement les corriger, tous les points se distinguant visuellement par leur résidu très grand en valeur absolue ont été étudiés au cas par cas.

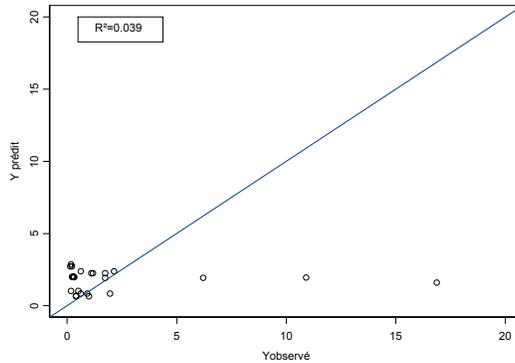


Figure 6 : Valeurs prédites en fonction des valeurs observées (en $Bq.kg^{-1}$ frais) pour le couple (bette, ^{141}Ce)

3.3 Etude des points suspects

La concordance entre les valeurs issues de la base de données SYLVESTRE et les valeurs provenant des rapports a été vérifiée et aucune erreur de saisie n'a été mise en évidence. Cette vérification a été effectuée pour chaque point suspect.

Une autre voie d'investigation a été la confrontation des points suspects à l'hypothèse initiale faite sur le modèle. Il a en effet été supposé que le dépôt est constant sur le temps de croissance du végétal. Afin de vérifier la validité de cette hypothèse, la variabilité du dépôt sur les différents mois composant le temps de croissance a été étudiée pour chacune des mesures disponibles. Pour cela, l'écart type de la variable « dépôt sur le temps de croissance du végétal » a été calculé. L'utilisation de cette valeur d'écart type est la suivante : si pour une observation cette valeur est très élevée, cela signifie que le dépôt n'est pas constant sur le temps de croissance du végétal. L'observation peut alors être éliminée du jeu de données. L'étendue de la variable « dépôt sur le temps de croissance » (différence entre le dépôt le plus faible et le dépôt le plus fort) aurait aussi pu être choisie comme critère d'élimination à la place de l'écart type, les conclusions auraient été les mêmes.

La Figure 7 représente le premier graphe de la Figure 5 sur lequel a été ajoutée, pour chaque observation, la valeur arrondie de l'écart type du dépôt calculé à partir de ces différentes valeurs prises sur le temps de croissance du végétal.

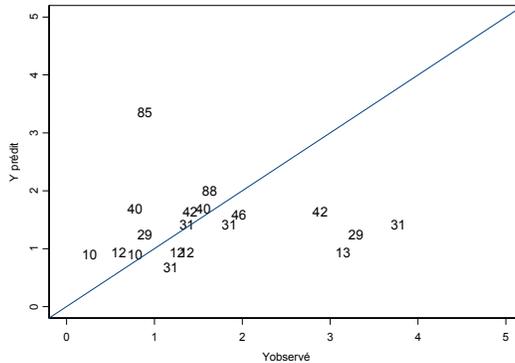


Figure 7 : Confrontation des valeurs prédites et observées (en Bq.kg⁻¹ frais) en fonction de l'écart type de la variable « dépôt sur le temps de croissance » pour le couple (chou, ¹⁴⁴Ce+¹⁴⁴Pr)

La Figure 7 permet de mettre en évidence le fait que les données disponibles ne vérifient pas l'hypothèse initiale du modèle. En effet, d'un mois à l'autre le dépôt varie. Mais, comme on peut le constater sur cette figure, ce ne sont pas les données aux résidus très grands en valeur absolue qui présentent les dépôts les plus variables. Aucune explication vérifiable n'a finalement pu être proposée pour les points suspects.

3.4 Deuxième estimation du rapport de captation

Pour prendre en compte les variations du dépôt sur le temps de croissance du végétal, nous proposons d'utiliser la formulation suivante :

$$C_{v,r}^f(t_d) = \frac{R_c}{R_{dt}} \left(\underbrace{\frac{D_{\Delta_{t_d}}}{\Delta_{t_d}} \frac{1 - e^{-(\lambda_b + \lambda_p)\Delta_{t_d}}}{\lambda_b + \lambda_p}}_{\text{dépôt du dernier mois}} + \underbrace{\sum_{i=t_d-\alpha+1}^{t_d-1} \frac{D_{\Delta_i}}{\Delta_i} \frac{1 - e^{-(\lambda_b + \lambda_p)\Delta_i}}{\lambda_b + \lambda_p}}_{\text{dépôts des mois antérieurs}} e^{-(\lambda_b + \lambda_p) \sum_{j=i+1}^{t_d} \Delta_j} \right) \quad - 4 -$$

Dans cette équation, le dépôt est supposé constant sur le mois et non pas sur le temps de croissance. Les phénomènes visant à réduire l'activité massique sont pris en compte : chaque dépôt mensuel est « corrigé » par la décroissance physique et biomécanique du radionucléide (par le terme représentant la phase d'élimination). Dans la suite, nous utiliserons toujours cette équation pour modéliser l'activité du végétal par transfert foliaire. On peut cependant penser que sur le mois, le dépôt est variable et donc considérer un pas de temps hebdomadaire ou journalier. Cependant, aucune mesure n'est disponible à ces échelles de temps pour notre période d'étude.

L'estimation du rapport de captation s'effectue de la même manière que précédemment (par la méthode des moindres carrés ordinaires). Les différentes estimations obtenues sont présentées dans le Tableau 9.

	$^{95}\text{Nb}+^{95}\text{Zr}$	$^{144}\text{Ce}+^{144}\text{Pr}$	^{141}Ce	$^{106}\text{Ru}+^{106}\text{Rh}$	^{103}Ru
Bette	0,385	0,224	0,428	0,113	0,330
Chou	0,156	0,058	-	-	-
Chou-fleur	0,197	0,034	0,092	-	-
Poireau	0,253	0,112	0,298	0,317	-
Salade	0,410	0,130	0,311	0,205	0,292

Tableau 9 : Valeurs estimées du rapport de captation par la méthode des moindres carrés ordinaires

Globalement, les valeurs estimées sont légèrement inférieures aux précédentes (Tableau 8) mais restent cohérentes avec la littérature. La plus grande variation s'observe pour le couple (bette, $^{95}\text{Zr}+^{95}\text{Nb}$), on passe d'un rapport de captation estimé de 0,642 à 0,385.

Les résultats graphiques sont présentés en Figure 8, toujours pour le même couple (chou, $^{144}\text{Ce}+^{144}\text{Pr}$). L'Annexe G regroupe les graphes des 19 autres couples (végétal, radionucléide) étudiés.

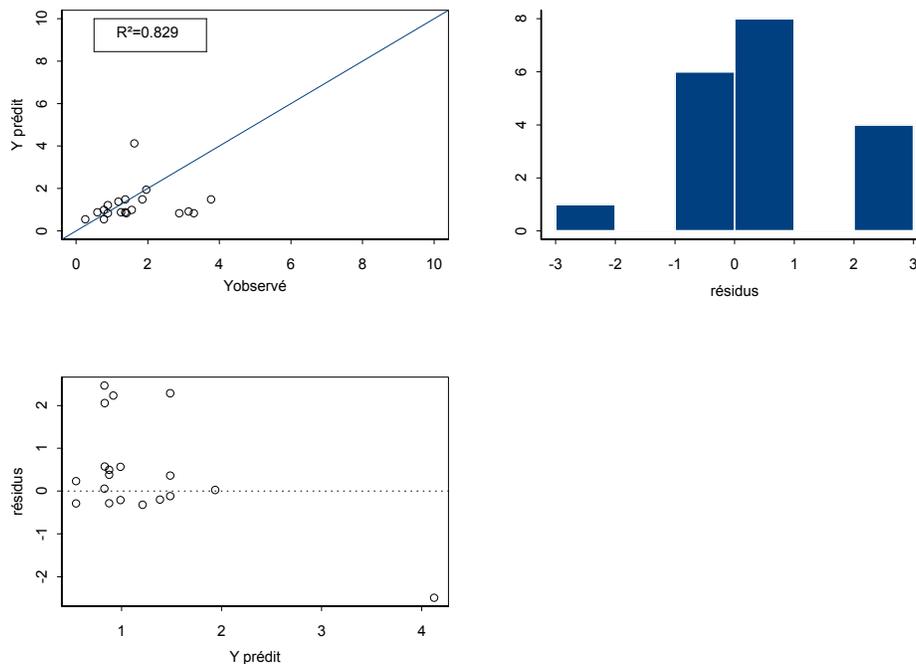


Figure 8 : Valeurs prédites en fonction des valeurs observées (en Bq.kg^{-1} frais) et analyses graphiques des résidus pour le couple (chou, $^{144}\text{Ce}+^{144}\text{Pr}$)

D'après le premier graphe, il semble que la confrontation entre les valeurs observées et les valeurs calculées par l'équation (ajustée par la méthode des moindres carrés) soit meilleure (le coefficient de détermination est meilleur). En effet, en comparant avec le graphe précédent (Figure 5), les points sont globalement plus proches de la droite $y=x$. La modification de l'équation améliore donc l'ajustement, mais ne permet toujours pas de

corriger les données précédentes aux résidus très grands en valeur absolue. En effet, la position de certains points semble toujours aberrante.

3.5 Estimation du rapport de captation en utilisant les séries de données supplémentaires sur le rendement culturel des bettes et des poireaux

L'ensemble des estimations précédentes a été réalisé à partir des données sur les rendements présentées dans le Tableau 7 (valeur fixe). Pour les bettes et les poireaux, des séries de données plus précises sont disponibles (Cf. Annexe E). De nouvelles estimations du rapport de captation ont été effectuées à partir de ces jeux de données (Cf. Tableau 10). Les résultats obtenus sont légèrement inférieurs aux précédents (Tableau 9). Cela est dû au fait que les séries de données plus précises sur les rendements sont inférieures aux valeurs utilisées dans le paragraphe précédent pour réaliser les estimations (3 kg.m^{-2} pour les bettes et poireaux), cela se traduit donc par une estimation plus faible du rapport de captation.

	$^{95}\text{Nb}+^{95}\text{Zr}$	$^{144}\text{Ce}+^{144}\text{Pr}$	^{141}Ce	$^{106}\text{Ru}+^{106}\text{Rh}$	^{103}Ru
Bette	0,271	0,164	0,285	0,076	0,231
Poireau	0,188	0,080	0,216	0,233	-

Tableau 10 : Valeurs estimées du rapport de captation par la méthode des moindres carrés ordinaires en utilisant la série de données supplémentaires sur les rendements

Les représentations graphiques, étant sensiblement identiques aux précédentes, elles ne sont pas présentées.

Une connaissance plus précise du rendement n'améliore guère la qualité de l'ajustement. Vu le temps d'acquisition des séries de données plus précises, il a été décidé de se contenter des premières valeurs moyennes acquises sur le rendement. Ce point a néanmoins été systématiquement vérifié en réalisant des estimations à partir de ce deuxième jeu de données lors du traitement des résultats de mesures des radionucléides à vie longue pour les poireaux.

3.6 Bilan

Cette étude a mis en évidence la faible qualité d'ajustement de l'équation (ajusté par la méthode des moindres carrés) aux mesures. D'une manière générale, on obtient des valeurs prédites plus fortes que les valeurs d'activité massique mesurées lorsque celles-ci sont faibles et l'inverse pour les plus fortes valeurs mesurées. Ainsi pour le couple (chou, $^{144}\text{Ce}+^{144}\text{Pr}$), une des valeurs de concentration mesurée est de $2,89 \text{ Bq.kg}^{-1}$ frais, tandis que l'équation (dont les paramètres ont été estimés par la méthode des moindres carrés) prédit une valeur de $0,83 \text{ Bq.kg}^{-1}$ frais (par l'équation 4).

La modification de l'équation pour mieux rendre compte des dépôts en fonction du pas de temps de l'étude ne suffit pas à obtenir un meilleur ajustement aux données observées. Il en

est de même pour la connaissance plus précise d'une entrée du modèle (le rendement cultural). Ainsi, même si les différentes valeurs estimées du rapport de captation sont cohérentes avec la bibliographie, elles ne peuvent pas être utilisées pour conclure sur son indépendance par rapport au radionucléide et/ou au végétal à l'intérieur de la catégorie légumes-feuilles.

4 TRAITEMENT DES SERIES DE DONNEES RELATIVES AUX RADIONUCLEIDES A VIE LONGUE : ESTIMATION DE TROIS PARAMETRES RADIOECOLOGIQUES DE L'EQUATION DE LA CONTAMINATION DES VEGETAUX

4.1 Contexte et objectif

Les travaux effectués précédemment ont mis en évidence de fortes disparités entre les prédictions de l'équation (dont les paramètres ont été estimés) et les données observées pour les radionucléides à vie longue. Les activités de ^{90}Sr et ^{137}Cs déposées à l'échelle du mois sont beaucoup moins variables que celles des radionucléides à vie courte. Ce nouveau traitement se rapproche ainsi de l'hypothèse initiale du modèle. Une amélioration de la qualité de l'ajustement peut donc être espérée.

Ce traitement des séries de données relatives aux radionucléides à vie longue, consiste à rechercher des valeurs régionalisées de trois paramètres radioécologiques de l'équation de la contamination des végétaux : le rapport de captation (R_c), le facteur de transfert racinaire (FT_r) et la constante de décroissance de la biodisponibilité du radionucléide dans le sol (λ_s). L'objectif est d'obtenir, par le biais de ces valeurs, des informations si possibles régionalisées sur ces trois paramètres : intervalle de variation et/ou distribution.

Des estimations des trois paramètres sont obtenues pour chaque triplet (légume-feuille, radionucléide, région) du Tableau 2 (43 triplets).

Le dépôt pouvant s'exprimer comme la somme d'un dépôt sec et d'un dépôt humide, nous avons choisi de réaliser les estimations successivement à partir de deux séries de données sur les dépôts : tout d'abord en considérant un dépôt total (les dépôts sec et humide sont considérés comme sommés) (paragraphe 4.2), puis en distinguant le dépôt sec du dépôt humide (paragraphe 4.3).

4.2 Estimation en considérant un dépôt total (dépôt sec et dépôt humide confondus)

4.2.1 Equation de la contamination des végétaux et méthode d'estimation

L'équation utilisée calcule la contamination d'un végétal v (en Bq.kg^{-1}) par un radionucléide r à la date t_d :

$$C_{v,r}(t_d) = \frac{R_c}{R_{dt}} \left(\frac{D_{\Delta_i}^{tot}}{\Delta_i} \frac{1 - e^{-(\lambda_b + \lambda_p)\Delta_i}}{\lambda_b + \lambda_p} + \sum_{i=t_d-\alpha+1}^{t_d-1} \frac{D_{\Delta_i}^{tot}}{\Delta_i} \frac{1 - e^{-(\lambda_b + \lambda_p)\Delta_i}}{\lambda_b + \lambda_p} e^{-(\lambda_b + \lambda_p) \sum_{j=i+1}^{t_d} \Delta_j} \right) + \frac{FT_r}{\mu h} \left(\sum_{i=t_1}^{t_d-1} D_{\Delta_i}^{tot} e^{-(\lambda_s + \lambda_r) \sum_{j=i+1}^{t_d} \Delta_j} + D_{\Delta_i}^{tot} \right) - 5 -$$

Les paramètres figurant dans cette équation sont ceux présentés dans le chapitre 2. La première partie de l'équation est celle utilisée précédemment pour modéliser l'activité du végétal suite au transfert foliaire, il vient se rajouter la deuxième partie modélisant la

contamination par transfert racinaire. Dans cette deuxième partie de l'équation, les dépôts antérieurs à la date de mesure sont sommés.

Considérons le modèle non linéaire suivant :

$$y_k = ax_k + bz_k[c] + \varepsilon_k \quad \text{pour } k = 1, \dots, n \quad - 6 -$$

et posons :

y_k : mesure k du radionucléide r dans le végétal v ,

a : rapport de captation,

b : facteur de transfert racinaire,

c : constante de décroissance du radionucléide biodisponible dans le sol,

$$x_k = \left(\frac{1}{R_{dt}} \left(\frac{D_{\Delta_{t_d}}^{tot}}{\Delta_{t_d}} \frac{1 - e^{-(\lambda_b + \lambda_p)\Delta_{t_d}}}{\lambda_b + \lambda_p} + \sum_{i=t_d-\alpha+1}^{t_d-1} \frac{D_{\Delta_i}^{tot}}{\Delta_i} \frac{1 - e^{-(\lambda_b + \lambda_p)\Delta_i}}{\lambda_b + \lambda_p} e^{-(\lambda_b + \lambda_p) \sum_{j=i+1}^{t_d} \Delta_j} \right) \right)_k,$$

$$z_k[c] = \left(\frac{1}{\mu h} \left(\sum_{i=t_1}^{t_d-1} D_{\Delta_i}^{tot} e^{-(c+\lambda_r) \sum_{j=i+1}^{t_d} \Delta_j} + D_{\Delta_{t_d}}^{tot} \right) \right)_k,$$

ε_k : résidu.

Estimer les trois paramètres R_c , FT_r et λ_s de l'équation 5 revient à estimer les paramètres a , b et c dans l'équation 6, (en considérant un échantillon de taille n). Ce modèle est non linéaire et il a une structure particulière : il est linéaire sur les paramètres a et b et non linéaire sur c . La méthode d'estimation classiquement utilisée dans ce cas de figure est celle des moindres carrés séparables (Golub & Pereyra, 1973) (Cf. Annexe H).

Cette méthode a été programmée sous le logiciel Mathematica (version 4). Pour certains échantillons, nous n'avons pas eu assez de mémoire disponible pour effectuer les calculs. Ce problème de mémoire vient principalement de la deuxième partie de l'équation qui calcule la concentration relative au transfert racinaire. En effet, le dépôt est sommé de la date initiale de contamination du sol jusqu'à la date de mesure et s'il y a 20 ans entre ces deux dates, $12\text{mois} \times 20 = 240$ dépôts sont sommés pour une observation (mesure de concentration), etc. pour les autres observations. Le paramètre c qui figure parmi les paramètres à estimer apparaît dans chaque composante de cette somme. Lors de l'étape d'estimation, lorsque des opérations sont effectuées sur le vecteur $Z(c)$, où $Z(c) = (z_1(c) \cdots z_k(c) \cdots z_n(c))$, le logiciel Mathematica manque d'espace disponible pour stocker l'information nécessaire à la réalisation du calcul.

Pour pallier cet inconvénient, il faudrait réduire le pas de temps de l'étude et considérer le semestre ou l'année au lieu du mois. Mais cela induirait une perte de précision. En effet,

l'hypothèse initiale faite sur le modèle serait encore moins vérifiée (constance du dépôt) et cela dégraderait les prédictions d'activités massiques.

Nous avons donc utilisé une méthode de minimisation numérique. Les valeurs de a , b et c minimisant la quantité

$$E = \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i + bz_i[c])^2$$

ont été recherchées grâce à un algorithme de minimisation issu du logiciel Mathematica (fonction *FindMinimum*).

Un inconvénient de cette technique est l'exactitude de la solution. En effet, contrairement à la méthode précédente (moindres carrés séparables) qui fournit un minimum global, il est possible que le résultat obtenu ici soit un minimum local.

La méthode des moindres carrés séparables a fonctionné pour quelques échantillons de faible taille : les triplets (chou, ^{90}Sr , Provence), (chou-fleur, ^{90}Sr , Provence), (chou-fleur, ^{137}Cs , Provence), (salade, ^{137}Cs , Roussillon), (salade, ^{137}Cs , Paris), (salade, ^{137}Cs , Nord), (salade, ^{137}Cs , Lorraine) et (salade, ^{137}Cs , Cote d'Azur) et a permis de valider les résultats de la méthode de minimisation numérique.

4.2.2 Résultats des estimations : cohérence globale avec la bibliographie

Pour les 43 échantillons disponibles les trois paramètres ont été estimés. Les résultats sont présentés dans les Tableaux 11 à 14 pour les 43 triplets (légume-feuille, radionucléide, région) étudiés. La valeur E , dans la dernière colonne des tableaux, correspond à la quantité qui a été minimisée et nous avons choisi de présenter les résultats relatifs à la décroissance totale de la biodisponibilité du radionucléide dans le sol sous la forme d'une période notée T_s (en année). Dans certain cas, des estimations négatives ont été obtenues, les paramètres ont alors été contraints de manière à obtenir des valeurs positives. Les estimations correspondantes sont présentées en gris foncé. Les différentes valeurs obtenues pour les trois paramètres vont être comparées aux valeurs issues de la bibliographie.

	⁹⁰ Sr				¹³⁷ Cs			
	R _c	FT _r	T _s	E	R _c	FT _r	T _s	E
Bourgogne Lyonnais	0,25	0,18	29,50	30,96	-	-	-	-
Bretagne	0,15	0,25	12,22	22,46	-	-	-	-
Cote d'Azur	0,02	0,13	10,61	2,72	-	-	-	-
Garonne	0,08	0,30	7,69	33,85	2,87E-08	0,04	15,02	1,25
Languedoc	0,11	0,09	16,21	9,85	6,72E-12	0,04	2,16E+10	6,83
Lorraine	0,09	0,16	16,30	8,05	0,49	0,01	3,11E+15	9,55
Nord	0,17	0,08	17,62	2,81	-	-	-	-
Paris	0,14	0,19	10,62	8,03	1,59E-06	0,06	6,80	0,09
Provence	0,10	0,16	10,85	87,99	0,02	1,72	0,42	248,82
Roussillon	0,08	0,22	3,86	0,48	-	-	-	-
Val de Loire	0,12	0,11	43,08	2,51	-	-	-	-

Tableau 11 : Estimations régionales des trois paramètres pour le légume-feuille « poireau » et les radionucléides ⁹⁰Sr et ¹³⁷Cs

	⁹⁰ Sr				¹³⁷ Cs			
	R _c	FT _r	T _s	E	R _c	FT _r	T _s	E
Bourgogne Lyonnais	5,32E-10	0,10	20,76	7,75	-	-	-	-
Bretagne	0,18	0,23	6,79	17,37	0,10	0,03	1,94E+16	1,84
Cote d'Azur	0,10	0,10	11,53	6,49	0,16	0,02	9,89	0,18
Garonne	0,07	0,22	6,96	34,39	1,67E-06	0,05	36,10	7,60
Languedoc	0,05	0,09	19,15	7,54	0,09	0,39	4,23	486,96
Lorraine	0,05	0,15	11,42	2,45	0,09	0,14	3,00	0,27
Nord	2,52E-12	0,29	4,62	12,46	1,66E-06	0,20	5,31	14,04
Paris	0,12	0,16	7,49	6,53	6,03E-04	0,07	8,52	1,45
Provence	0,02	2,63	0,56	442,36	0,09	3,33	0,44	1954,42
Roussillon	0,35	0,08	17,03	7,83	0,19	0,01	51,15	0,14
Val de Loire	0,04	0,11	14,29	2,23	-	-	-	-

Tableau 12 : Estimations régionales des trois paramètres pour le légume-feuille « salade » et les radionucléides ⁹⁰Sr et ¹³⁷Cs

	⁹⁰ Sr				¹³⁷ Cs			
	R _c	FT _r	T _s	E	R _c	FT _r	T _s	E
Bourgogne Lyonnais	1,81E-07	0,10	1,68E+09	15,99	-	-	-	-
Languedoc	-	-	-	-	0,05	0,12	5,18	5,01
Provence	0,06	0,23	1,90E+16	95,51	0,16	0,04	14,75	384,62

Tableau 13 : Estimations régionales des trois paramètres pour le légume-feuille « chou » et les radionucléides ⁹⁰Sr et ¹³⁷Cs

	^{90}Sr				^{137}Cs			
	R_c	FT_r	T_s	E	R_c	FT_r	T_s	E
Languedoc	-	-	-	-	2,10E-10	0,04	10,55	0,60
Provence	0,02	0,16	3,58E+14	22,02	0,03	0,51	0,51	29,51

Tableau 14 : Estimations régionales des trois paramètres pour le légume-feuille « chou-fleur » et les radionucléides ^{90}Sr et ^{137}Cs

Le rapport de captation R_c

Les valeurs estimées du rapport de captation sont comprises dans l'intervalle [0,016 ; 0,493]. Les très faibles valeurs ont été exclues car obtenues lorsque les paramètres ont été contraints pour prendre des valeurs positives. Pour la captation par temps sec, les valeurs proposées pour les légumes-feuilles dans différents codes de calculs utilisés en radioécologie sont de :

- 0,3 dans FARMLAND (Brown, 1995),
- 0,33 dans ABRICOT (Santucci, 1995),
- 0,5 dans FOCON (Rommens, 1999).

Pour la captation par temps humide c'est la valeur de 0,1 qui est proposé dans FOCON (Rommens, 1999)).

Ces valeurs génériques, qui sont utilisées dans les codes de calculs, sont généralement des valeurs plutôt majorantes. On peut donc considérer que les estimations obtenues sont globalement cohérentes avec les valeurs proposées par la littérature.

Le facteur de transfert racinaire FT_r

Les différentes estimations du facteur de transfert racinaire ont été comparées aux valeurs issues de (Nisbet et al., 1999) qui fournit une estimation de la valeur moyenne du paramètre, exprimé en $Bq.kg^{-1}$ de végétal sec par $Bq.kg^{-1}$ de sol sec, pour les légumes-feuilles pour les radionucléides ^{90}Sr et ^{137}Cs et par type de sol, à partir de compilation de la base de données de l'UIR. Des changements d'unité sont donc nécessaires pour ramener les valeurs du facteur de transfert racinaire en $Bq.kg^{-1}$ de végétal frais par $Bq.kg^{-1}$ de sol sec. C'est une valeur moyenne du rapport poids frais/poids sec pour les légumes-feuilles (18) qui a été utilisée pour effectuer ce changement d'unité (calculée à partir des données issues de la base de données SYLVESTRE). Cette valeur correspond à une proportion d'eau dans le poids frais de végétal d'environ 94%, cohérente avec la valeur de 92% citée dans (Quinault et al., 1989). Les valeurs issues de (Nisbet et al., 1999) ont été converties et sont présentées dans le Tableau 15.

Radionucléide	Type de sol	Facteur de transfert racinaire	Intervalle de confiance à 95%	
			Min	Max
⁹⁰ Sr	Sables	0,178	0,025	1,222
	Limons	0,133	0,036	0,506
	Argiles	0,100	0,046	0,222
	Organiques	0,018	-	-
¹³⁷ Cs	Sables	0,0117	0,0014	0,0944
	Limons	0,0067	0,0007	0,0667
	Argiles	0,0037	0,0004	0,0322
	Organiques	0,0161	0,0009	0,3056

Tableau 15 : Valeurs du facteur de transfert racinaire issues de (Nisbet et al., 1999) recalculées en $Bq.kg^{-1}$ de végétal frais par $Bq.kg^{-1}$ de sol sec pour les légumes-feuilles

De fortes valeurs du facteur de transfert racinaire ont été estimées pour la région Provence, respectivement $2,6 Bq.kg^{-1}$ de végétal frais par $Bq.kg^{-1}$ de sol sec pour le couple (salade, ⁹⁰Sr), $3,3 Bq.kg^{-1}$ de végétal frais par $Bq.kg^{-1}$ de sol sec pour le couple (salade, ¹³⁷Cs) et $1,7$ de végétal frais par $Bq.kg^{-1}$ de sol sec pour le couple (poireau, ¹³⁷Cs).

Excepté ces fortes valeurs, les estimations du facteur de transfert racinaire sont comprises dans les intervalles suivants :

- pour le ⁹⁰Sr : [0,079 ; 0,296] avec une valeur moyenne de $0,162 Bq.kg^{-1}$ de végétal frais par $Bq.kg^{-1}$ de sol sec,
- pour le ¹³⁷Cs : [0,008 ; 0,501] avec une valeur moyenne de $0,11 Bq.kg^{-1}$ de végétal frais par $Bq.kg^{-1}$ de sol sec.

Ces plages de valeurs ont été comparées à celles proposées dans le Tableau 15, en considérant un sol limoneux car c'est le type de sol dominant en France. Pour le ⁹⁰Sr, il apparaît que les valeurs estimées sont entièrement comprises dans l'intervalle de valeurs proposé par (Nisbet et al., 1999) : [0,036 ; 0,506]. Dans le cas du ¹³⁷Cs, la plupart des estimations sont assez proches de la valeur maximale (0,0667) proposée par (Nisbet et al., 1999). Dans certains cas, les valeurs estimées sont plus élevées et semblent donc plus proches d'un sol de type sableux ou organique. N'ayant pas d'information sur les sols associés à chaque prélèvement de végétal, la confrontation n'a pas pu aller plus loin.

La période de décroissance totale de la biodisponibilité du radionucléide dans le sol T_s

Excepté les très fortes valeurs estimées (obtenues lorsque les paramètres ont été contraints), les estimations de la période de décroissance de la biodisponibilité du radionucléide dans le sol sont comprises dans les intervalles suivants :

- pour le ⁹⁰Sr : [0,56 ; 43,07] avec une valeur moyenne de 13,59 ans,
- pour le ¹³⁷Cs : [0,42 ; 51,15] avec une valeur moyenne de 11,46 ans.

Dans (Rommens, 1997), les valeurs préconisées pour le modèle FOCON sont d'environ 35 ans pour le ⁹⁰Sr et 139 ans pour le ¹³⁷Cs. Les estimations obtenues avec les mesures traitées ici

sont donc globalement plus faibles que les chiffres de la littérature, en particulier pour le ^{137}Cs . Ce type d'écart a déjà été observé avec les mesures *in situ* du réseau OPERA (Roussel-Debet et al., 2005) et celles du suivi radioécologique autour des centrales EDF (Roussel-Debet et Duffa, 2005).

4.2.3 Résultats des estimations : mauvaise qualité des ajustements

De la même manière que précédemment, des représentations graphiques ont été réalisées afin d'évaluer la qualité des ajustements et examiner l'allure des résidus. Les échantillons étudiés étant assez nombreux, nous avons choisi de présenter à titre d'exemple les résultats graphiques pour les triplets (poireau, ^{90}Sr , Nord) et (salade, ^{137}Cs , Garonne) car ils illustrent relativement bien les différents résultats obtenus (Cf. Figures 9 et 10). Pour les autres triplets, les graphes peuvent être visualisés en Annexe I.

D'une manière générale, la confrontation des valeurs prédites et observées met en évidence une mauvaise qualité de l'ajustement. Là encore on obtient des valeurs plus fortes que les valeurs de concentrations mesurées lorsque celles-ci sont faibles tandis que pour les fortes mesures, c'est l'inverse. La quasi-totalité des graphes illustre cette remarque.

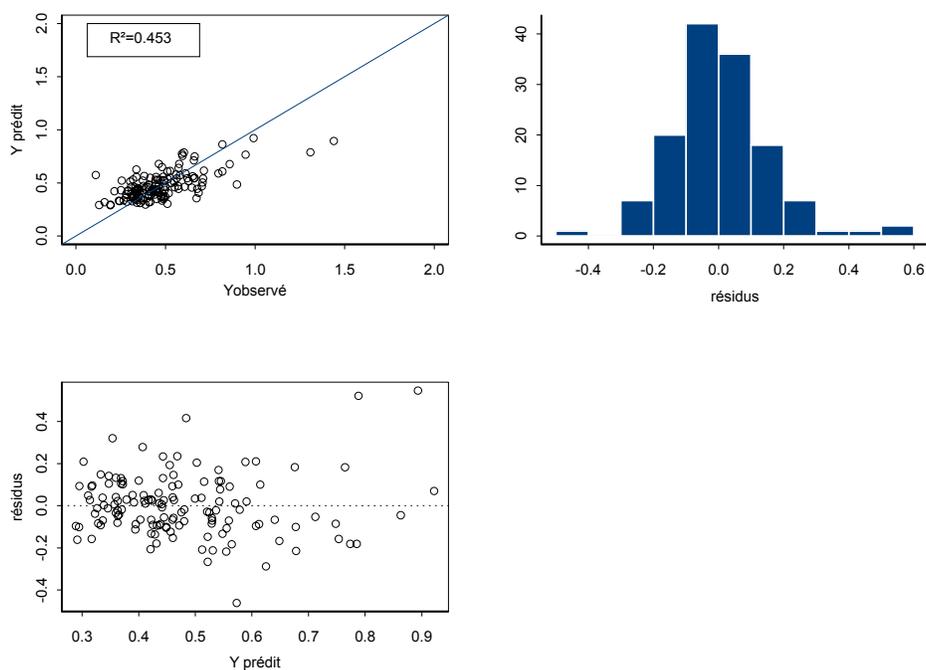


Figure 9 : Valeurs prédites en fonction des valeurs observées (en Bq.kg^{-1} frais) et analyses graphiques des résidus pour le triplet (poireau, ^{90}Sr , Nord)

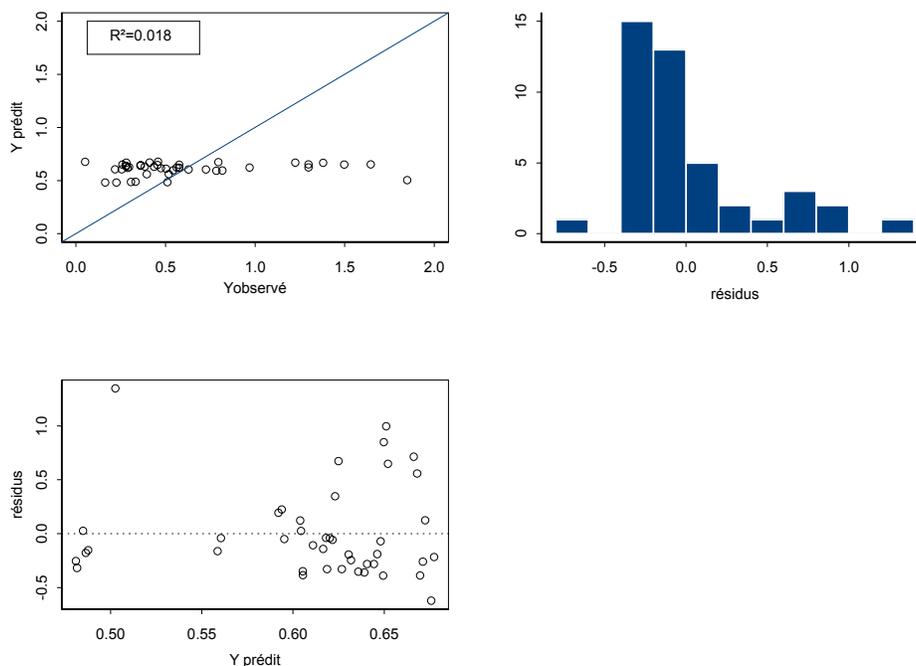


Figure 10 : Valeurs prédites en fonction des valeurs observées (en Bq.kg⁻¹ frais) et analyses graphiques des résidus pour le triplet (salade, ¹³⁷Cs, Garonne)

La qualité des ajustements est très variable selon les échantillons, avec pour certains des prédictions qui s'écartent fortement de la réalité observée, c'est le cas des données présentées sur la Figure 10. Que ce soit pour les faibles ou les fortes valeurs de concentration, les prédictions sont quasiment toujours identiques, le nuage de points a la forme d'une « bande » parallèle à l'axe des abscisses.

4.2.4 Estimation à partir des séries de données supplémentaires sur le rendement cultural

L'ensemble des estimations précédentes a été effectué en utilisant les données de rendement cultural présentées dans le Tableau 7. Pour le poireau, de nouvelles estimations ont été réalisées à partir des séries de données plus précises sur le rendement cultural. Les résultats et commentaires sont présentés en Annexe J.

4.3 Travaux effectués en distinguant le dépôt sec du dépôt humide

La première partie de l'équation 5 déterminant l'activité du végétal par transfert foliaire devient :

$$C_{v,r}^{fol}(t_d) = \frac{R_{c,sec}}{R_{dt}} \left(\frac{D_{\Delta_{t_d}}^{sec}}{\Delta_{t_d}} \frac{1 - e^{-(\lambda_b + \lambda_p)\Delta_{t_d}}}{\lambda_b + \lambda_p} + \sum_{i=t_d-\alpha+1}^{t_d-1} \frac{D_{\Delta_i}^{sec}}{\Delta_i} \frac{1 - e^{-(\lambda_b + \lambda_p)\Delta_i}}{\lambda_b + \lambda_p} e^{-(\lambda_b + \lambda_p) \sum_{j=i+1}^{t_d} \Delta_j} \right) + \frac{R_{c,hum}}{R_{dt}} \left(\frac{D_{\Delta_{t_d}}^{hum}}{\Delta_{t_d}} \frac{1 - e^{-(\lambda_b + \lambda_p)\Delta_{t_d}}}{\lambda_b + \lambda_p} + \sum_{i=t_d-\alpha+1}^{t_d-1} \frac{D_{\Delta_i}^{hum}}{\Delta_i} \frac{1 - e^{-(\lambda_b + \lambda_p)\Delta_i}}{\lambda_b + \lambda_p} e^{-(\lambda_b + \lambda_p) \sum_{j=i+1}^{t_d} \Delta_j} \right) \quad - 7 -$$

Le rapport de captation se décompose alors en un rapport de captation par temps sec ($R_{c,sec}$) et un rapport de captation par temps de pluie ($R_{c,hum}$), ces deux quantités étant sans dimension. Ainsi, dans cette partie, nous allons estimer quatre paramètres radioécologiques : $R_{c,sec}$, $R_{c,hum}$, FT_r et λ_s . La méthode d'estimation est la même que celle utilisée précédemment (méthode de minimisation numérique).

Les différentes estimations obtenues sont présentées dans les Tableaux 16 à 19. Pour les paramètres FT_r et T_s , les valeurs obtenues sont assez proches des précédentes. Les estimations du rapport de captation par temps humide ont tendance à être plus faibles que les valeurs issues de la littérature (0,1 dans (Rommens, 1997)). La comparaison des valeurs estimées des rapports de captation sec et humide fait apparaître des contradictions. Par exemple, pour le couple (poireau, ^{90}Sr), $R_{c,sec}$ est supérieur à $R_{c,hum}$ pour les régions Provence et Roussillon. Alors que pour une région géographiquement assez proche de ces deux régions, le Languedoc, c'est le contraire.

	^{90}Sr					^{137}Cs				
	$R_{c,sec}$	$R_{c,hum}$	FT_r	T_s	E	$R_{c,sec}$	$R_{c,hum}$	FT_r	T_s	E
Bourgogne L.	1,84E-08	0,35	0,18	28,58	30,76	-	-	-	-	-
Bretagne	0,40	0,05	0,25	12,20	22,36	-	-	-	-	-
Cote d'Azur	1,70E-07	0,04	0,13	10,64	2,72	-	-	-	-	-
Garonne	0,38	3,33E-10	0,29	7,72	33,62	7,96E-11	1,01E-10	0,04	15,02	1,25
Languedoc	5,44E-09	0,17	0,09	16,14	9,81	4,42E-09	2,97E-10	0,04	1,87E+14	6,83
Lorraine	0,33	0,20	0,17	16,13	7,90	2,50	4,47E-07	9,93E-02	9,46E-04	7,29
Nord	0,03	0,22	0,08	17,64	2,79	-	-	-	-	-
Paris	0,34	0,06	0,19	10,65	7,98	2,551E-16	4,48E-17	0,06	6,80	0,09
Provence	0,26	0,05	0,15	12,56	84,44	0,21	5,67E-10	0,80	0,68	243,03
Roussillon	0,41	1,25E-08	0,23	3,44	0,46	-	-	-	-	-
Val de Loire	0,20	0,09	0,11	45,87	2,51	-	-	-	-	-

Tableau 16 : Estimations régionales des trois paramètres pour le légume-feuille « poireau » et les radionucléides ^{90}Sr et ^{137}Cs

	^{90}Sr					^{137}Cs				
	$R_{c,sec}$	$R_{c,hum}$	FT_r	T_s	E	$R_{c,sec}$	$R_{c,hum}$	FT_r	T_s	E
Bourgogne L.	0,04	1,70E-09	0,12	21,39	7,74	-	-	-	-	-
Bretagne	1,25E-08	0,25	0,28	6,82	17,22	9,99E-11	0,23	0,02	2,18E+13	1,67
Cote d'Azur	0,03	0,15	0,12	11,70	6,47	0,24	0,10	0,02	10,48	0,17
Garonne	5,11E-10	0,10	0,26	6,98	34,31	1,176E-11	5,80E-11	0,05	35,66	7,60
Languedoc	0,03	0,07	0,10	18,97	7,54	0,44	1,53E-08	0,40	4,00	485,77
Lorraine	0,23	1,28E-06	0,18	11,08	2,42	0,07	0,09	0,14	3,14	0,27
Nord	5,90E-19	2,73E-18	0,35	4,62	12,46	1,004E-19	7,44E-18	0,20	5,28	14,04
Paris	0,10	0,133	0,19	7,49	6,53	0,02	1,36E-10	0,07	8,54	1,45
Provence	0,14	1,46E-08	2,28	0,72	439,22	0,12	0,08	3,20	0,45	1954,13
Roussillon	1,49E-06	0,52	0,10	15,70	7,66	0,05	0,23	0,01	52,17	0,14
Val de Loire	0,359	4,87E-12	0,13	14,32	2,10	-	-	-	-	-

Tableau 17 : Estimations régionales des trois paramètres pour le légume-feuille « salade » et les radionucléides ^{90}Sr et ^{137}Cs

	^{90}Sr					^{137}Cs				
	$R_{c,sec}$	$R_{c,hum}$	FT_r	T_s	E	$R_{c,sec}$	$R_{c,hum}$	FT_r	T_s	E
Bourgogne L.	9,57E-21	1,19E-18	9,93E-02	2,47E+17	15,99	-	-	-	-	-
Languedoc	-	-	-	-	-	1,08E-06	0,08	0,12	5,196	4,99
Provence	0,06	0,06	2,32E-01	2,88E+16	95,51	0,36	0,08	0,03	5,99E+16	376,66

Tableau 18 : Estimations régionales des trois paramètres pour le légume-feuille « chou » et les radionucléides ^{90}Sr et ^{137}Cs

	^{90}Sr					^{137}Cs				
	$R_{c,sec}$	$R_{c,hum}$	FT_r	T_s	E	$R_{c,sec}$	$R_{c,hum}$	FT_r	T_s	E
Languedoc	-	-	-	-	-	3,91E-09	1,53E-10	0,04	10,55	0,60
Provence	0,02	0,02	0,16	4,77E+15	22,02	0,11	0,01	0,06	5,57	29,80

Tableau 19 : Estimations régionales des trois paramètres pour le légume-feuille « chou-fleur » et les radionucléides ^{90}Sr et ^{137}Cs

Là encore, la mauvaise qualité de l'ajustement peut s'observer sur les graphes des Figures 11 et 12, réalisés toujours pour les mêmes triplets (poireau, ^{90}Sr , Nord) et (salade, ^{137}Cs , Garonne) et en Annexe K pour les autres échantillons.

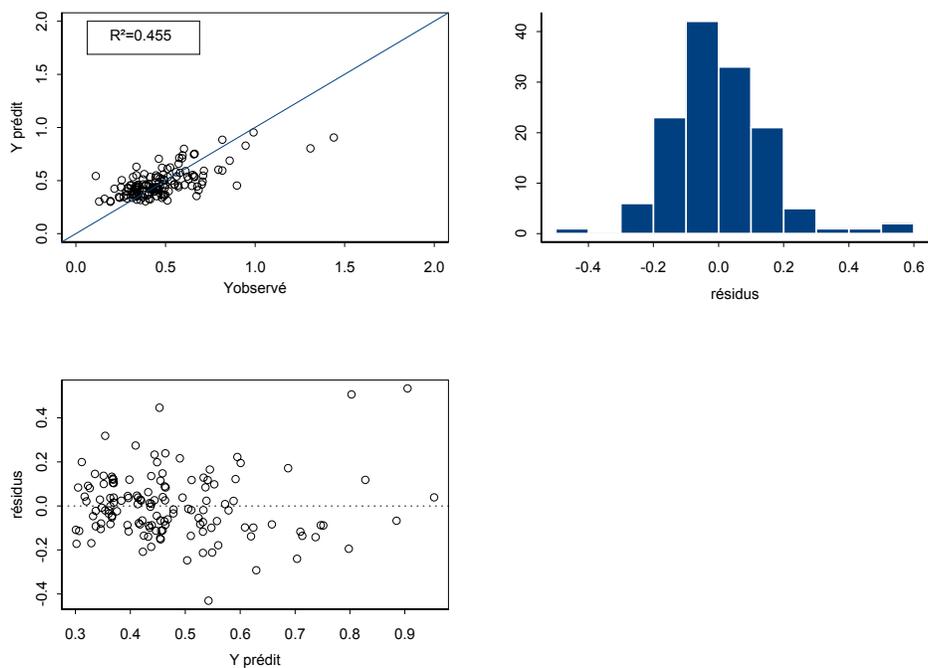


Figure 11 : Valeurs prédites en fonction des valeurs observées (en $Bq.kg^{-1}$ frais) et analyses graphiques des résidus pour le triplet (poireau, ⁹⁰Sr, Nord)

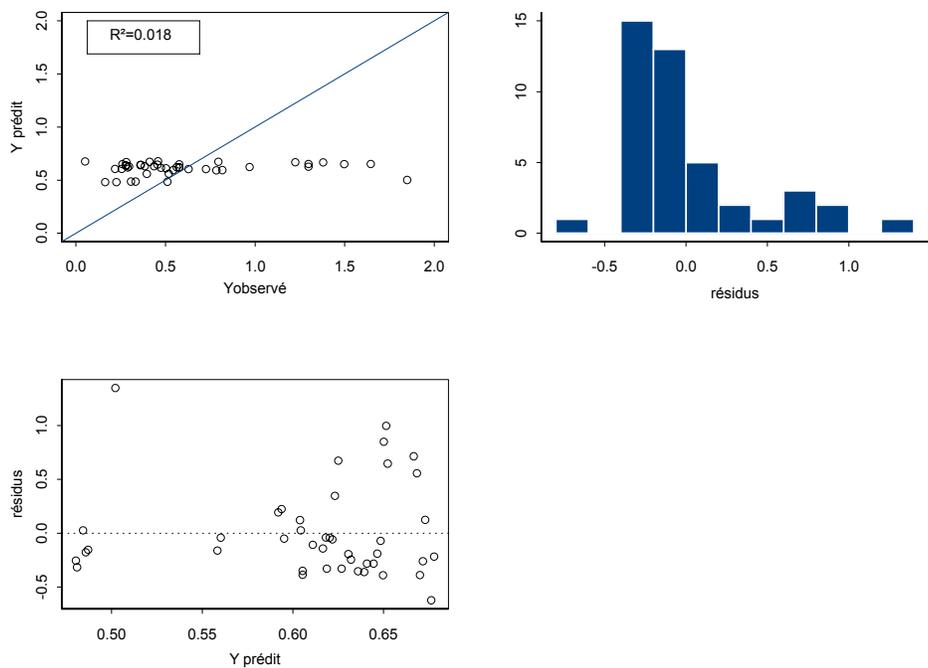


Figure 12 : Valeurs prédites en fonction des valeurs observées (en $Bq.kg^{-1}$ frais) et analyses graphiques des résidus pour le triplet (salade, ¹³⁷Cs, Garonne)

4.4 Bilan

Le bilan, en termes de qualité de l'ajustement entre modèle et mesures, est le même que lors du traitement des séries de données relatives aux radionucléides à vie courte. Les prédictions de concentration par l'équation de la contamination des végétaux (dont les paramètres ont été estimés par la méthode de minimisation numérique) conduisent à de forts écarts avec les résultats de mesures : pour beaucoup de triplets (légume-feuille, radionucléide, région), on obtient des valeurs plus fortes que les valeurs de concentration mesurées lorsque celles-ci sont faibles tandis que pour les plus fortes activités mesurées, c'est l'inverse. Le fait de distinguer le dépôt sec du dépôt humide et d'estimer alors deux rapports de captation n'améliore pas la qualité de l'ajustement. Ainsi, vu les qualités d'ajustement obtenues, les différentes estimations ne peuvent pas être utilisées afin d'obtenir les informations régionalisées souhaitées, malgré la cohérence des valeurs avec la littérature.

5 SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS

L'objectif initial de ce travail était d'obtenir des renseignements (intervalle de variation et distribution) sur trois paramètres radioécologiques de l'équation de la contamination des végétaux (rapport de captation (R_c), facteur de transfert racinaire (FT_r) et constante de décroissance de la biodisponibilité du radionucléide dans le sol (λ_s)) à partir de diverses séries de données disponibles pour différentes régions françaises.

L'ensemble des travaux effectués n'a pas permis d'obtenir les informations souhaitées. L'équation de transfert de la contamination radioactive vers les végétaux a été ajustée à partir de divers jeux de données. Dans l'ensemble, les différents cas étudiés ont mis en évidence une mauvaise qualité de l'ajustement. Les nombreuses valeurs estimées ne peuvent donc pas être utilisées pour obtenir les renseignements désirés. En effet, les paramètres d'un modèle ont une signification lorsque celui-ci s'ajuste correctement aux données observées. Dans notre étude, les graphes des valeurs prédites en fonction des valeurs observées ont démontré que ce n'était pas le cas. Ainsi, même si la plupart des valeurs estimées sont cohérentes avec la bibliographie, elles ne peuvent pas être utilisées pour proposer des informations régionalisées.

La mauvaise qualité de prédiction obtenue est liée à la fois au modèle (équation de la contamination des végétaux) et aux données utilisées.

Le fait que l'équation suppose un dépôt constant sur le pas de temps de l'étude, qui dans notre cas est le mois, n'est peut être pas vérifié. En effet, le dépôt est lissé sur le mois et ces variations sont négligées. Pour les prendre en compte, il faudrait réduire le pas de temps de l'étude en travaillant par exemple au pas de temps hebdomadaire, mais les données ne sont pas disponibles à cette échelle de temps.

Le manque de précision sur les données contribue probablement aussi à ces problèmes d'ajustements.

- Certains paramètres de l'équation sont fixés (temps de croissance ou masse volumique du sol), à défaut de mesures disponibles pour chaque observation de la variable réponse (concentration dans le végétal).
- Les séries de données disponibles sur les activités massiques dans les végétaux sont imprécises en termes de date et de lieu. Le fait que les dates de prélèvement aient été affectées au 28 de chaque mois contribue vraisemblablement à expliquer les écarts constatés entre valeurs prédites et observées.
- Certaines mesures semblent aussi très élevées : il est possible que les végétaux aient mal été lavés (présence de terre), les radionucléides présents dans la terre influençant alors fortement la concentration finale.
- La concentration dans les végétaux n'a peut-être pas été mesurée lorsqu'ils étaient à maturité.

Pour pouvoir utiliser des données de matrices environnementales afin de renseigner un modèle compartimental de transfert, il apparaît indispensable de connaître le plus précisément possible le terme source (ici l'activité déposée) et les caractéristiques de prélèvement associées à la mesure de l'activité massique. Les enseignements qui peuvent être tirés de cette analyse sont donc des recommandations, pour l'acquisition de données, en vue de l'estimation de paramètres d'un modèle radioécologique. Les améliorations suivantes peuvent être proposées :

- effectuer des mesures hebdomadaires (ou journalières) du dépôt, ou se donner les moyens de reconstituer les valeurs du dépôt à cette échelle de temps.

Dans le cas du pas de temps mensuel, le dépôt sec est supposé partout identique à celui mesuré en région parisienne. Cette hypothèse n'est plus valide lorsqu'il s'agit d'un pas de temps hebdomadaire (ou journalier), car les masses d'air n'arrivent pas toutes la même semaine (ou le même jour) dans les différentes régions françaises. Afin de travailler par région, il faudrait alors disposer de mesures régionales hebdomadaires (ou journalières) du dépôt ou de méthode d'estimation de ces valeurs. Les travaux en cours dans le cadre de la thèse de L. Bourcier sur l'approche événementielle du dépôt (volet atmosphérique du projet SENSIB) ont pour objectif d'améliorer la connaissance des dépôts à l'échelle des événements pluvieux (Masson et al. 2005),

- renseigner lors du prélèvement certaines caractéristiques précises du végétal (stade de développement), du sol (nature du sol, masse volumique) et la localisation temporelle et spatiale de l'échantillon. A l'heure actuelle, les prélèvements réalisés au LERCM dans le cadre des études de terrain et stockés dans la base de données SYLVESTRE remplissent le plus souvent ces conditions. Les caractéristiques suivantes sont notamment référencées : date, lieu, coordonnées GPS, masse volumique et certaines caractéristiques du sol (pour environ un tiers des échantillons de légumes-feuilles). Depuis quelques années, pour certains échantillons, le stade de développement du végétal est aussi précisé en commentaire (plant, maturité, stade monté).

6 LISTE DES REFERENCES

Brown J. & Simmonds J.R., (1995). *FARMLAND, a dynamic model for the transfer of radionuclides through terrestrial foodchain*. NRPB report n°R273.

Département de Protection Sanitaire (CEA/IPSN/DPS), (1961-1980). *Surveillance de la radioactivité de la chaîne alimentaire et de prélèvements divers*. Bulletins trimestriels de mesures du Service d'Hygiène Atomique, Fontenay-aux-Roses.

Golub G.H, & Pereyra V. (1973). *The differentiation of pseudo-inverses and nonlinear least squares problems whose variables separate*. SIAM J. Numerical Analysis, 10(2), 413-432.

Groupe Radioécologique Nord-Cotentin, Rapport Technique (2001). *Identification et estimation des incertitudes associées aux évaluations de doses obtenues par le modèle mathématique du Groupe Radioécologique Nord-Cotentin*. Rapport IPSN DPRE/SERNAT 2001-13.

IAEA, (1994). *Handbook of parameter values for the prediction of radionuclides transfer in temperate environment*. International Atomic Energy Agency: technical reports series n° 364.

Le Bohec J., Erard P. & Leteinturier J., (1993). *Le Poireau guide pratique*. Ctifl (Centre technique interprofessionnel des fruits et légumes).

Masson O., Saey L., Paulat P., Bois E., (2005). *Etude événementielle du lessivage de l'atmosphère*. SFRP 2005, Nantes.

Mercat-Rommens C. & Renaud P., (2003). *Rapport de lancement du projet Sensibilité Radioécologique*. Rapport IRSN/DEI/SESURE 2003-02.

Mercat-Rommens C. & Renaud P., (2004). *Projet Sensibilité Radioécologique (SENSIB) Bilan de l'utilisation opérationnelle du concept de sensibilité de l'environnement*. Rapport IRSN DEI/SESURE 2004-12.

Nisbet A.F., Woodman R. F. M. & Haylock R. G. E., (1999). *Recommended soil-to-plant transfer factors for radiocesium and radiostrontium for use in arable systems*. National Radiological Protection Board, NRPB-R304. Chilton.

Quinault J.M., Cartier Y. & Bourdeau F., (1989). *Guide d'évaluation de l'impact de rejets radioactifs atmosphériques*. Electricité de France, Direction de l'équipement.

Renaud P., Maubert H., Badie C., (1997). *Contamination des productions agricoles de base suite à une émission atmosphérique accidentelle. Première partie : Les modèles de transferts des radionucléides dans la chaîne alimentaire terrestre*. Document SERE 97-017.

Renaud P., Louvat D. & Vray F., (2003). *Les retombées en France des essais atmosphériques d'armes nucléaires. Production, fractionnement, dispersion atmosphérique et dépôt des produits de fission*. Rapport IRSN DEI/SESURE 2003-03.

Rommens C. (1997). *Etude bibliographique et choix des données par défaut pour les logiciels de calcul des impacts dosimétriques*. Note technique SEGR/SAER/97 n°25.

Rommens C., Morin A. & Merle-Szeremeta A. (1999). *Le modèle FOCON d'évaluation de l'impact dosimétrique des rejets radioactifs atmosphériques des installations nucléaires en fonctionnement normal*. Radioprotection - vol 34, n°2, pp 195-209.

Roussel-Debet S., Duffa C. (2005). *Radioactivité en ¹³⁷Cs dans l'environnement terrestre des sites électronucléaires d'Electricité de France - Interprétation des données acquises de 1989 à 2004*. Rapport IRSN DEI/SESURE/LERCM 2005-36.

Roussel-Debet S., Masson O., Salaun G. (2005). *Radioactivité en ¹³⁷Cs de l'environnement terrestre français - Interprétation des données OPERA acquises de 1993 à 2004*. Rapport IRSN DEI/SESURE/LERCM 2005-10.

Santucci P., (1995). *Manuel d'utilisation du code ABRICOT, version 2.0*. IPSN, Rapport DPEI/SERGD/LESTS 95-03.

Service Central de protection contre les Rayonnements Ionisants (SCPRI), (1961-1980). *Bulletins mensuels de résultats de mesures*. République Française, Ministère de la Santé.

UNSCEAR, (1982). *Rayonnements ionisants : sources et effets biologiques*. Rapport à l'Assemblée Générale du Comité Scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants.

UNSCEAR, (2000). *Sources and effects of ionizing radiation*. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Report to the General Assembly.

Vray F., (2002). *Contamination des végétaux par dépôt atmosphérique chronique de ⁹⁰Sr : informations tirées de l'étude de la période 1961-1980*. Rapport IRSN DPRE/SERNAT 2002-29.

Vray F. & Renaud P., (2004). *Contamination de la chaîne alimentaire par les produits de fission émis lors des essais aériens d'armes nucléaires*. Rapport IRSN DEI/SESURE 2004-19.

7 LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A : Hauteur de pluie moyenne mensuelle régionale (<i>mm</i>).	44
ANNEXE B : Résultats des recherches bibliographiques effectuées sur le temps de croissance	45
ANNEXE C : Calendrier de production du poireau par zone issus de (Le Bohec et al., 1993). ...	46
ANNEXE D : Résultats des recherches bibliographiques effectuées sur le rendement	47
ANNEXE E : Données supplémentaires sur les rendements pour les légumes bette et poireau.	48
ANNEXE F : Représentations graphiques concernant la première estimation du rapport de captation : valeurs prédites en fonction des valeurs observées, histogramme des résidus et représentation des résidus en fonction des valeurs prédites pour l'ensemble des couples étudiés	49
ANNEXE G : Représentations graphiques concernant la deuxième estimation du rapport de captation : valeurs prédites en fonction des valeurs observées, histogramme des résidus et représentation des résidus en fonction des valeurs prédites pour l'ensemble des couples étudiés	53
ANNEXE H : Méthode des moindres carrés séparables	57
ANNEXE I : Représentations graphiques relatives à l'estimation des trois paramètres R_c , FT_r et λ_s : valeurs prédites en fonction des valeurs observées, histogramme des résidus et représentation des résidus en fonction des valeurs prédites pour l'ensemble des triplets étudiés.	58
ANNEXE J : Estimations des trois paramètres radioécologiques de l'équation de la contamination des végétaux à partir des séries de données supplémentaires sur le rendement cultural pour le poireau (dépôt sec et dépôt humide confondus).....	67
ANNEXE K : Représentations graphiques relatives à l'estimation des quatre paramètres $R_{c,sec}$, $R_{c,hum}$, FT_r et λ_s : valeurs prédites en fonction des valeurs observées, histogramme des résidus et représentation des résidus en fonction des valeurs prédites pour l'ensemble des triplets étudiés.	69

8 LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Données disponibles relatives aux radionucléides à vie courte.....	7
Tableau 2 : Données disponibles relatives aux radionucléides à vie longue.....	7
Tableau 3 : Dépôt de ⁹⁰ Sr antérieur à la période d'étude.....	11
Tableau 4 : Constante de décroissance radioactive et période associée	13
Tableau 5 : Valeurs sélectionnées pour les temps de croissance des différents légumes-feuilles étudiés.....	14
Tableau 6 : Valeurs sélectionnées pour le temps de croissance du poireau dans les différentes régions étudiées.....	14
Tableau 7 : Valeurs sélectionnées pour les rendements des différents légumes-feuilles étudiés	14
Tableau 8 : Valeurs estimées du rapport de captation par la méthode des moindres carrés ordinaires.....	18
Tableau 9 : Valeurs estimées du rapport de captation par la méthode des moindres carrés ordinaires.....	22
Tableau 10 : Valeurs estimées du rapport de captation par la méthode des moindres carrés ordinaires en utilisant la série de données supplémentaires sur les rendements	23
Tableau 11 : Estimations régionales des trois paramètres pour le légume-feuille « poireau » et les radionucléides ⁹⁰ Sr et ¹³⁷ Cs	28
Tableau 12 : Estimations régionales des trois paramètres pour le légume-feuille « salade » et les radionucléides ⁹⁰ Sr et ¹³⁷ Cs	28
Tableau 13 : Estimations régionales des trois paramètres pour le légume-feuille « chou » et les radionucléides ⁹⁰ Sr et ¹³⁷ Cs	28
Tableau 14 : Estimations régionales des trois paramètres pour le légume-feuille « chou-fleur » et les radionucléides ⁹⁰ Sr et ¹³⁷ Cs.....	29
Tableau 15 : Valeurs du facteur de transfert racinaire issues de (Nisbet et al., 1999) recalculées en Bq.kg ⁻¹ de végétal frais par Bq.kg ⁻¹ de sol sec pour les légumes-feuilles.....	30
Tableau 16 : Estimations régionales des trois paramètres pour le légume-feuille « poireau » et les radionucléides ⁹⁰ Sr et ¹³⁷ Cs	33
Tableau 17 : Estimations régionales des trois paramètres pour le légume-feuille « salade » et les radionucléides ⁹⁰ Sr et ¹³⁷ Cs	34
Tableau 18 : Estimations régionales des trois paramètres pour le légume-feuille « chou » et les radionucléides ⁹⁰ Sr et ¹³⁷ Cs	34
Tableau 19 : Estimations régionales des trois paramètres pour le légume-feuille « chou-fleur » et les radionucléides ⁹⁰ Sr et ¹³⁷ Cs.....	34

9 LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Régions ayant donné lieu à des prélèvements (Vray, 2002)	6
Figure 2 : Mesures des divers radionucléides à vie courte en fonction de leur date de prélèvement	8
Figure 3 : Représentation graphique des différents résultats de mesures de ^{90}Sr disponibles..	9
Figure 4 : Représentation graphique des différents résultats de mesures de ^{137}Cs disponibles	10
Figure 5 : Valeurs prédites en fonction des valeurs observées (en Bq.kg^{-1} frais), histogramme des résidus et représentation des résidus en fonction des valeurs prédites pour le couple (chou, $^{144}\text{Ce}+^{144}\text{Pr}$).....	19
Figure 6 : Valeurs prédites en fonction des valeurs observées (en Bq.kg^{-1} frais) pour le couple (bette, ^{141}Ce)	20
Figure 7 : Confrontation des valeurs prédites et observées (en Bq.kg^{-1} frais) en fonction de l'écart type de la variable « dépôt sur le temps de croissance » pour le couple (chou, $^{144}\text{Ce}+^{144}\text{Pr}$)	21
Figure 8 : Valeurs prédites en fonction des valeurs observées (en Bq.kg^{-1} frais) et analyses graphiques des résidus pour le couple (chou, $^{144}\text{Ce}+^{144}\text{Pr}$)	22
Figure 9 : Valeurs prédites en fonction des valeurs observées (en Bq.kg^{-1} frais) et analyses graphiques des résidus pour le triplet (poireau, ^{90}Sr , Nord)	31
Figure 10 : Valeurs prédites en fonction des valeurs observées (en Bq.kg^{-1} frais) et analyses graphiques des résidus pour le triplet (salade, ^{137}Cs , Garonne)	32
Figure 11 : Valeurs prédites en fonction des valeurs observées (en Bq.kg^{-1} frais) et analyses graphiques des résidus pour le triplet (poireau, ^{90}Sr , Nord)	35
Figure 12 : Valeurs prédites en fonction des valeurs observées (en Bq.kg^{-1} frais) et analyses graphiques des résidus pour le triplet (salade, ^{137}Cs , Garonne)	35

ANNEXE A : Hauteur de pluie moyenne mensuelle régionale (mm).

	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
1 BOURGOGNE LYONNAIS	56,7	53,5	57,9	60	86,2	69,5	55,8	71,1	70,9	68,6	67,8	60,6
2 BRETAGNE	93,7	77,4	72	53,3	65,7	46,8	41,7	44,8	61,7	81,3	91,4	93,6
3 COTE D'AZUR	81,1	80,5	65,4	59,8	48,7	31,4	14,6	33,1	56,1	104,3	93,4	76
4 GARONNE	83,1	75,5	66,5	66	78,5	58,2	48,1	55,3	61,2	72,4	74,7	80,3
5 LANGUEDOC	69,3	68,7	55,6	53,5	53,2	34	19,5	41,1	59,3	115,7	65,2	60,7
6 LORRAINE	49,9	47,1	48,2	52,7	74	74,4	59,6	71,5	57,6	50,5	56,5	55,1
7 NORD	57,9	45,1	53,6	47,6	53,2	57,5	53,2	50,7	60,7	68,5	75,1	63,8
8 PARIS	54,9	47	54	48,8	60,6	51,8	55,4	46,7	53,9	55,2	59	54,8
9 PROVENCE	48,5	55,6	51,6	54,5	54,2	39,7	23,5	42,7	56	86,6	59,4	54,5
10 ROUSSILLON	49,4	45,2	43,4	51,1	51,5	28,3	17,1	34,4	48,8	92,6	59,9	53
11 VAL DE LOIRE	70,5	61,9	59,4	48,2	62,4	44,3	46,8	42,6	53,6	66,2	71,5	69,4

Les différentes stations considérées pour le calcul des moyennes mensuelles :

BOURGOGNE ET LYONNAIS

Rhône : Lyon.

Côte D'or : Dijon.

BRETAGNE

Ille-et-Vilaine : Rennes, Dinard.

Côtes-d'Armor : Ile de Bréhat.

Finistère : Brest, Lanvéoc.

Morbihan : Lorient.

Loire-Atlantique : St-Nazaire, Nantes.

COTE D'AZUR

Alpes maritimes : Antibes, Cap Ferrat, Nice.

Var : Cap Camarat, Le Luc, Toulon.

LANGUEDOC

Gard : Nîmes.

Hérault : Montpellier, Sète.

LORRAINE

Haut-Rhin : Mulhouse.

Bas-Rhin : Strasbourg.

Meurthe-et-M. : Nancy.

NORD

Oise : Beauvais.

Somme : Abbeville.

Nord : Dunkerque.

Pas-de-Calais : Boulogne s/ Mer.

Aisne : St-Quentin.

PARIS

Yvelines : Villacoublay, Trappes.

Essonne : Orly, Brétigny-sur-Orge.

Seine-et-Marne : Melun.

PROVENCE

Bouches-du-Rhône : Marseilles, Salon, Istres.

Alpes de Haute Provence : Saint-Auban.

Vaucluse : Orange.

ROUSSILLON

Pyrénées Orientales : Cap Béar, Perpignan.

VAL DE LOIRE

Indre-et-Loire : Tours.

Maine-et-Loire : Angers.

Loire-atlantique : Nantes.

ANNEXE B : Résultats des recherches bibliographiques effectuées sur le temps de croissance

<i>Légume</i>	<i>Référence</i>		<i>Type/variété</i>	<i>Tc (en jours)</i>	
				Min	Max
Bette	<i>Larousse Agricole 2002</i>			180	
Chou	<i>Larousse Agricole 2002</i>		Chou de printemps	150	150
			Chou été et automne	90	150
			Chou à Choucroute	150	150
			Chou d'hiver	180	210
			Chou de milan	180	240
Chou-fleur	<i>GRNC, 2001</i>	<i>Larousse Agricole 1981</i>		150	240
		<i>Sunasse 1999</i>		90	240
		<i>Soltner, 1990</i>		130	180
	<i>Larousse Agricole 2002</i>		Chou fleur d'automne (Sud est)	92	184
Poireau	<i>GRNC, 2001</i>	<i>Larousse Agricole 1981</i>		150	210
		<i>Sunasse 1999</i>		180	
		<i>Mazoyer et Santucci</i>		120	150
	<i>Larousse Agricole 2002</i>		Culture de pleine terre (été)	90	120
		Culture de pleine terre (automne)	120	150	
		Culture de pleine terre (début printemps)	150	250	
Salade	<i>GRNC, 2001</i>	<i>Larousse Agricole 1981</i>	Scarole, frisée	100	120
			Laitue	30	80
		<i>Sunasse 1999</i>	Mâche	60	110
			Laitue	60	80
		<i>Mazoyer et Santucci</i>	Laitue	60	90
			Mâche	60	90
	<i>Larousse Agricole 2002</i>		Laitue (zone méridionale) pleine terre	61	136
			Scarole, frisée	61	66
		Mâche (pleine terre ou sous abris)	40	110	

ANNEXE C : Calendrier de production du poireau par zone issus de (Le Bohec et al., 1993).

Région	Période de production	Plantation	Récolte	Temps de croissance (jours)	
				Min	Max
Val de Loire	<i>AUTOMNE HIVER</i>	juin-juillet	septembre-avril	90	270
Rhône Alpes	<i>ETE</i>	mars-avril avril-mai	juin-mi-août juillet	90 60	140 90
	<i>AUTOMNE-HIVER</i>	mai-juillet	septembre-avril	120	270
PACA	<i>ETE-AUTOMNE</i>	juin	septembre-octobre	90	120
	<i>AUTOMNE</i>	août	novembre-décembre	90	120
	<i>HIVER</i>	juillet	janvier-mars	180	240
	<i>PRINTEMPS</i>	août-septembre	avril-juin	240	270
Ile de France	<i>AUTOMNE</i>	juin	octobre-décembre	120	180
	<i>HIVER</i>	juin	janvier-mars	215	270
	<i>PRINTEMPS</i>	février-mars	mai-juin	90	
Nord Pas de Calais	<i>PRINTEMPS ETE</i>	mars-avril avril-mai	Fin mai-juillet juillet-septembre	90 90	120
	<i>AUTOMNE</i>	juin	septembre-décembre	90	180
	<i>HIVER</i>	juin-juillet	janvier-avril	210	270
Bretagne	<i>FIN AUTOMNE-HIVER</i>	juin-juillet	décembre à mars-avril	180	270
Centre (Loir et Cher, Loiret)	<i>AUTOMNE</i>	juin-juillet	septembre-décembre	90	150

Les zones utilisées pour renseigner les différentes régions de l'étude sont les suivantes :

- Bourgogne et Lyonnais : Rhône Alpes et Centre,
- Bretagne : Bretagne,
- Cote d'Azur : PACA,
- Nord : Nord Pas de Calais,
- Paris : Ile de France,
- Provence : PACA,
- Val de Loire : Val de Loire.

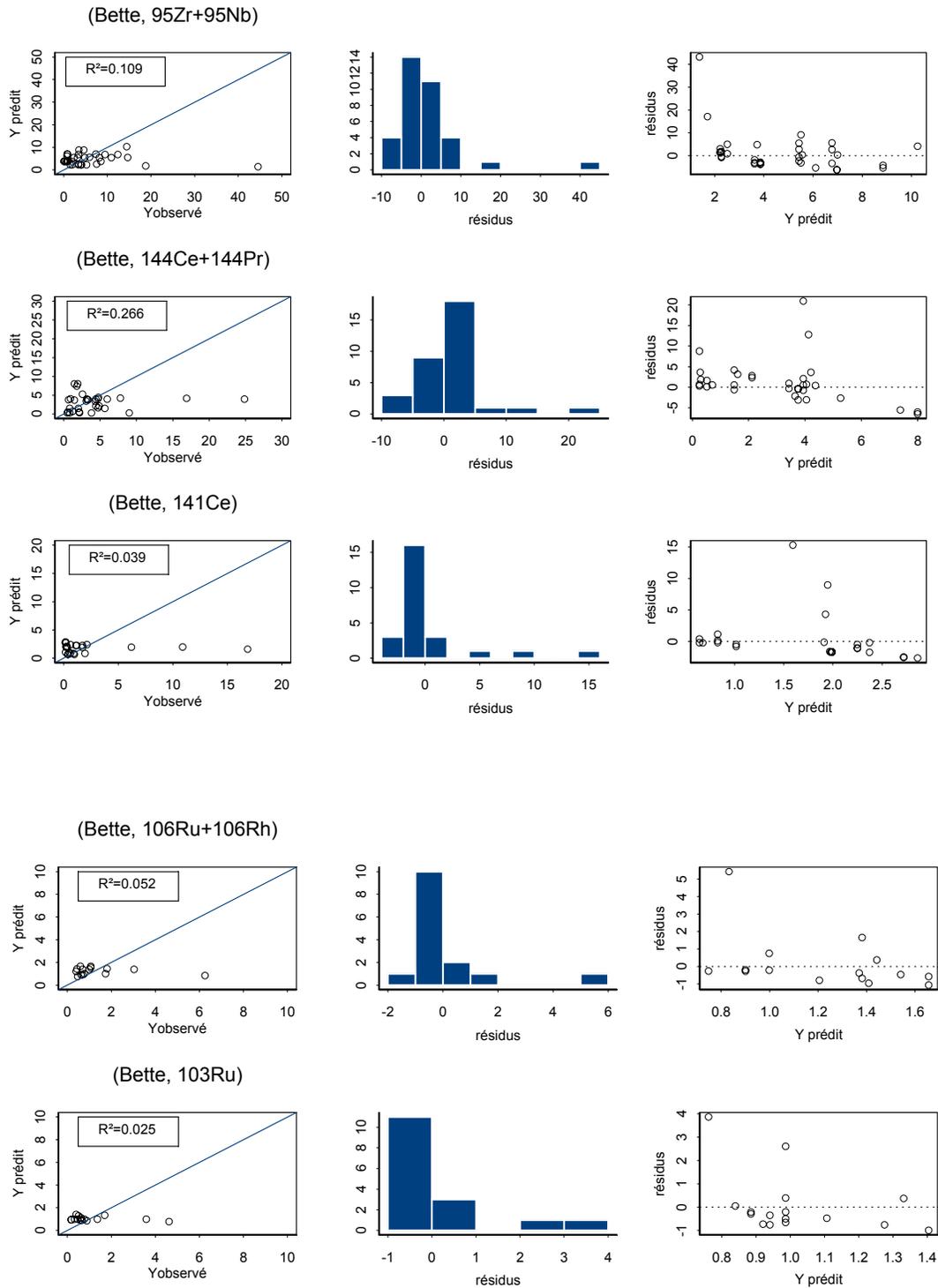
ANNEXE D : Résultats des recherches bibliographiques effectuées sur le rendement

Légume	Référence	Type/variété	Rendement (kg.m ⁻²)	
			Min	Max
Bette	<i>Larousse Agricole 2002</i>		3,02	
	<i>Statistique agricole annuelle, 2004</i>		3,22	
Chou	<i>GRNC, 2001</i> <i>Larousse Agricole 1981</i>		2,5	8
	<i>Statistique agricole annuelle, 2004</i>	Choux brocolis à jets	0,92	
		Choux de Bruxelles	1,71	
		Choux autres	2,29	
Chou-fleur	<i>GRNC, 2001</i> <i>Larousse Agricole 1981</i>		1	2,5
	<i>Statistique agricole annuelle, 2004</i>		1,50	
Poireau	<i>GRNC, 2001</i> <i>Larousse Agricole 1981</i> <i>Mazoyer et Santucci</i>		3,00	5,00
			1,00	3,00
	<i>Statistique agricole annuelle, 2004</i>		2,78	
Salade	<i>Statistique agricole annuelle, 2004</i>	Laitues pommées	2,59	
		Laitues romaines	2,41	
		Chicorées frisées	2,43	
		Chicorées scaroles	2,81	
		Autres salades	1,95	

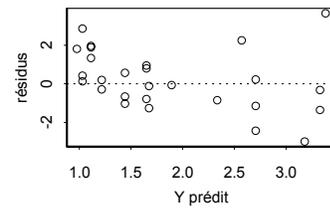
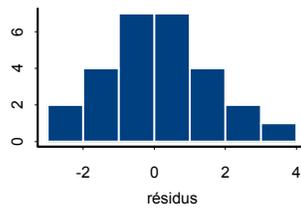
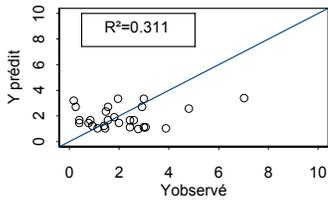
ANNEXE E : Données supplémentaires sur les rendements pour les légumes bette et poireau.

Rendement (kg.m ⁻²)												
BETTE		POIREAU										
Année	LANGUEDOC	BOURGOGNE LYONNAIS	BRETAGNE	COTE D'AZUR	GARONNE	LANGUEDOC	LORRAINE	NORD	PARIS	PROVENCE	ROUSSILLON	LOIRE
1961	-	3,63	2,71	3,00	1,73	2,59	3,28	2,32	3,09	3,48	2,50	2,99
1962	-	3,44	2,68	3,00	1,59	2,35	3,11	2,52	2,06	3,30	1,20	3,06
1963	-	3,51	2,80	3,50	1,96	2,10	3,32	3,19	3,49	3,32	1,80	2,86
1964	-	2,30	2,36	4,00	1,80	2,10	3,28	3,15	3,11	3,35	1,39	2,86
1965	-	2,61	2,43	3,50	1,66	2,15	3,34	3,06	2,95	3,08	1,60	2,66
1966	-	2,41	2,58	2,10	1,63	2,12	2,93	3,05	3,16	2,89	1,60	7,53
1967	-	2,72	2,82	2,70	1,63	2,21	2,76	3,21	3,07	2,87	1,60	2,62
1968	2	4,37	2,81	2,04	1,55	2,30	2,81	3,15	3,29	2,99	1,69	3,05
1969	2,23	3,60	2,90	3,32	1,57	2,33	2,80	3,05	3,13	2,98	1,80	2,90
1970	2,5	2,37	2,69	3,22	1,68	2,36	2,67	2,71	2,90	2,97	1,65	2,84
1971	2,5	2,34	2,74	3,21	1,65	2,35	2,70	2,59	3,02	2,90	1,90	2,62
1972	2,5	2,29	2,60	3,06	1,68	2,44	2,67	2,47	3,27	2,92	1,80	2,73
1973	2,5	2,30	2,68	3,08	1,61	2,05	2,61	2,46	2,81	2,87	1,80	2,88
1974	2,5	2,36	2,61	3,03	1,71	2,05	2,60	2,37	3,94	2,74	2,00	2,74
1975	2,2	2,38	2,73	3,04	1,68	2,10	2,56	2,46	3,91	2,86	1,70	2,65
1976	2,1	2,02	1,88	3,01	1,62	2,08	6,93	1,77	1,70	2,87	2,00	2,27
1977	2,1	2,27	2,76	3,01	1,73	2,15	2,62	2,44	3,45	2,82	1,90	2,67
1978	2	2,11	2,59	3,02	1,62	2,15	2,50	2,26	3,31	2,82	2,35	2,85
1979	1,9	2,21	2,72	3,01	1,79	2,13	2,70	2,33	2,30	2,68	2,12	2,87
1980	2,1	1,96	2,70	2,65	1,77	2,20	2,42	2,34	3,05	2,69	2,10	2,46

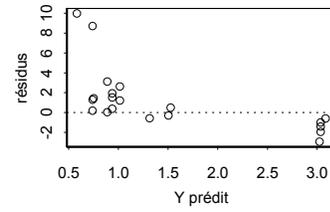
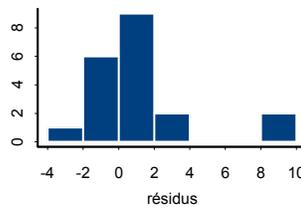
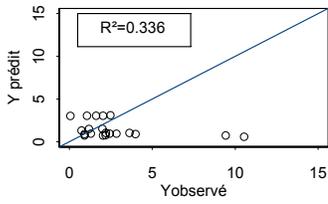
ANNEXE F : Représentations graphiques concernant la première estimation du rapport de captation : valeurs prédites en fonction des valeurs observées, histogramme des résidus et représentation des résidus en fonction des valeurs prédites pour l'ensemble des couples étudiés



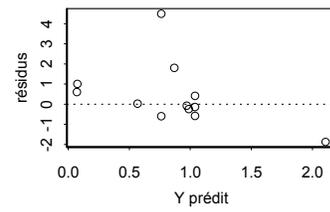
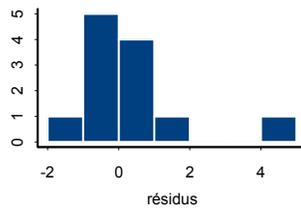
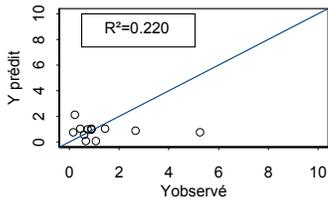
(Chou, 95Zr+95Nb)



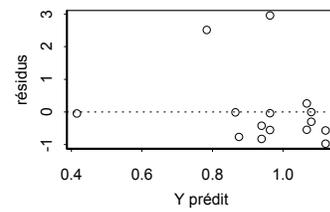
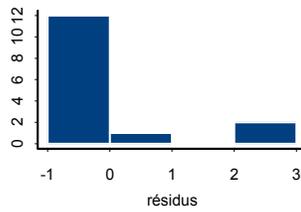
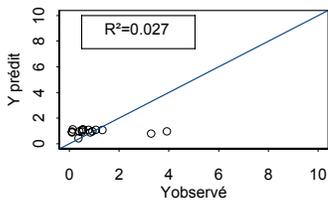
(Chou-fleur, 95Zr+95Nb)



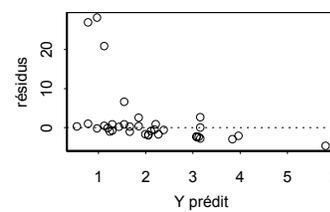
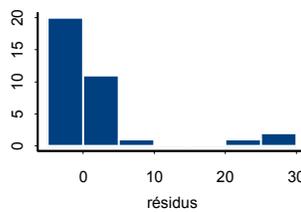
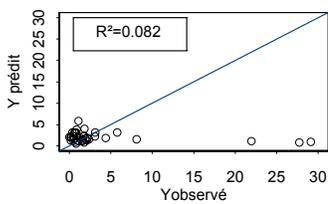
(Chou-fleur, 144Ce+144Pr)



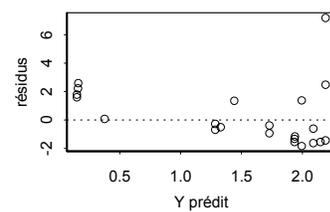
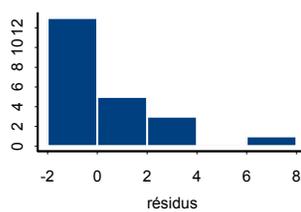
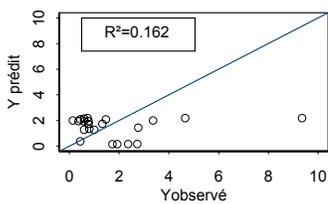
(Chou-fleur, 141Ce)



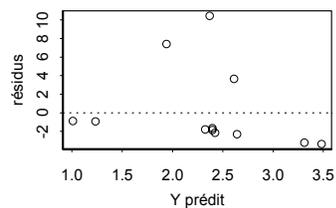
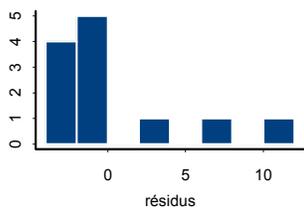
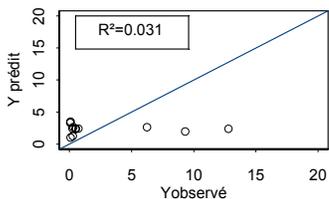
(Poireau, 95Zr+95Nb)



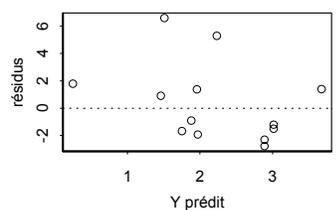
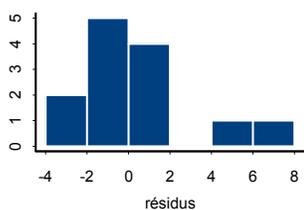
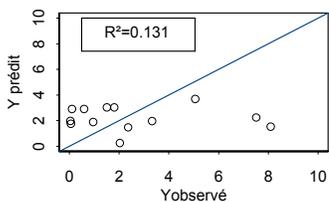
(Poireau, 144Ce+144Pr)



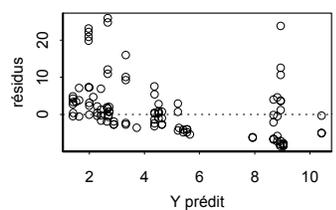
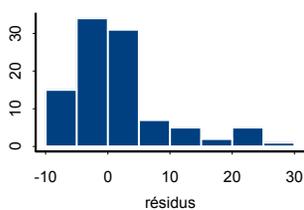
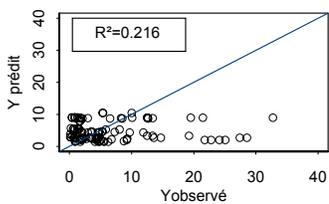
(Poireau, 141Ce)



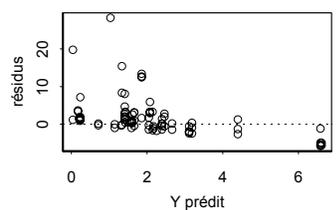
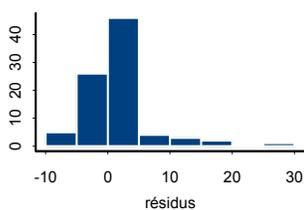
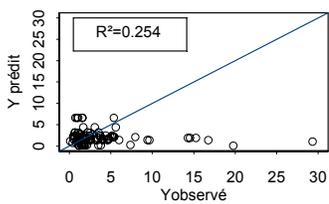
(Poireau, 106Ru+106Rh)



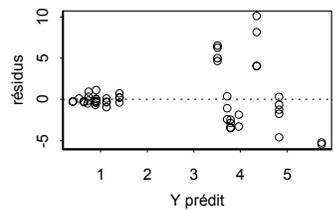
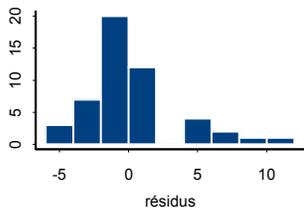
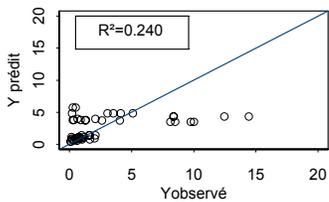
(Salade, 95Zr+95Nb)



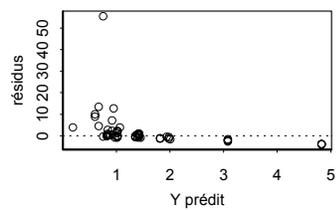
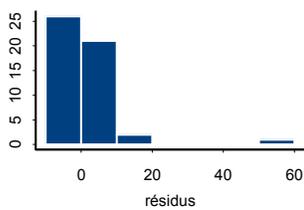
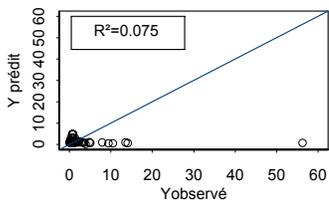
(Salade, 144Ce+144Pr)



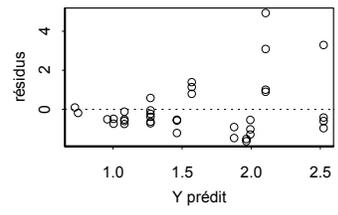
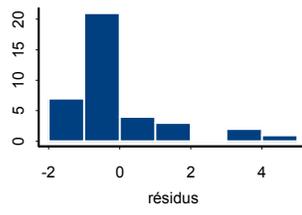
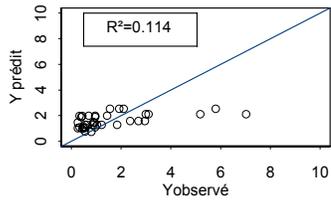
(Salade, 141Ce)



(Salade, 106Ru+106Rh)

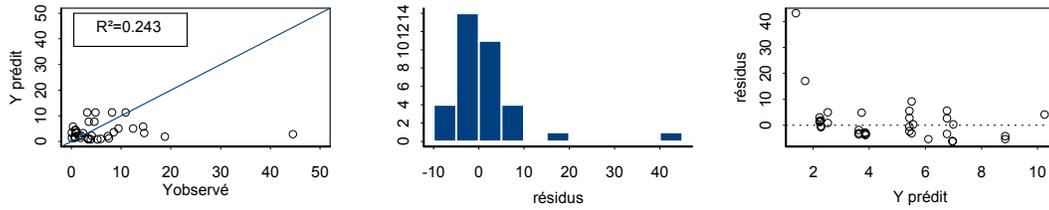


(Salade, 103Ru)

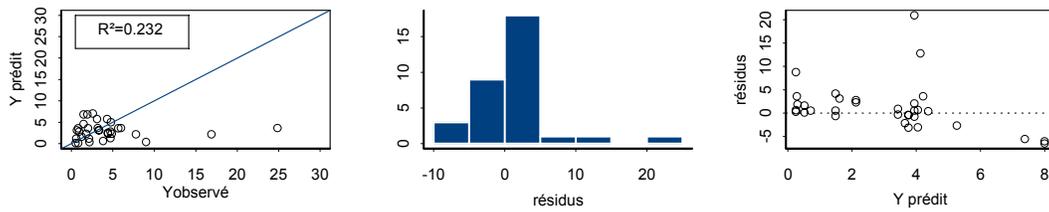


ANNEXE G : Représentations graphiques concernant la deuxième estimation du rapport de captation : valeurs prédites en fonction des valeurs observées, histogramme des résidus et représentation des résidus en fonction des valeurs prédites pour l'ensemble des couples étudiés

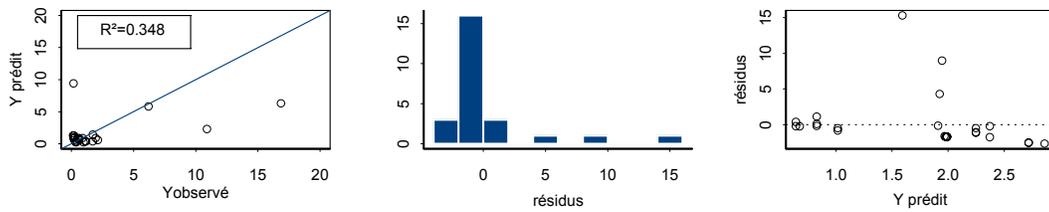
(Bette, 95Zr+95Nb)



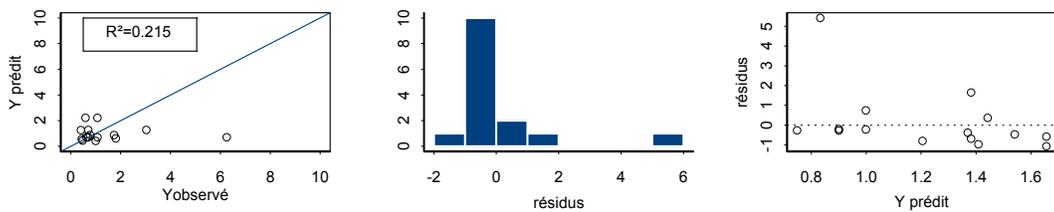
(Bette, 144Ce+144Pr)



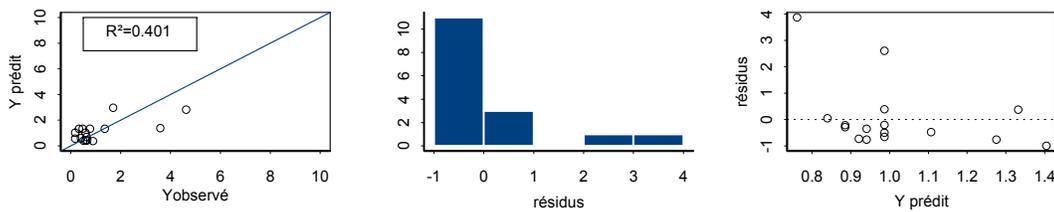
(Bette, 141Ce)



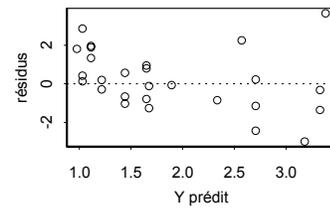
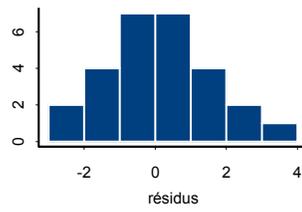
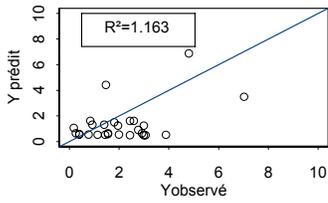
(Bette, 106Ru+106Rh)



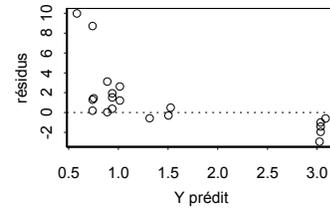
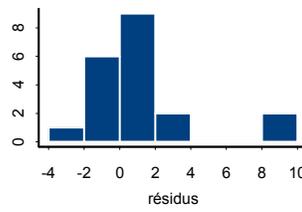
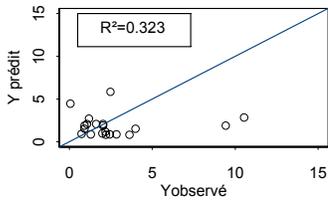
(Bette, 103Ru)



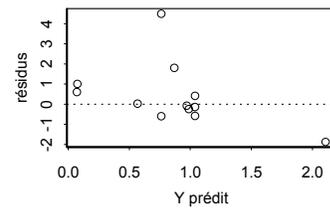
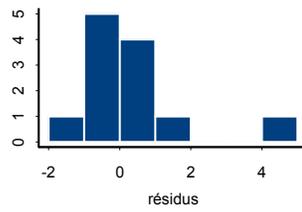
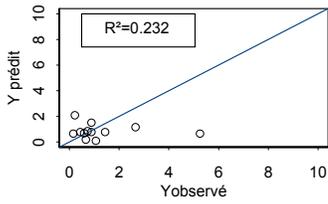
(Chou, 95Zr+95Nb)



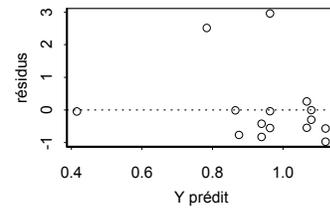
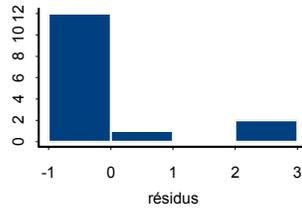
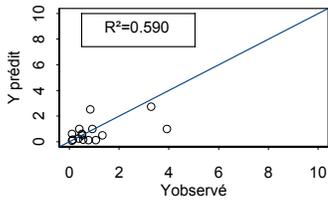
(Chou-fleur, 95Zr+95Nb)



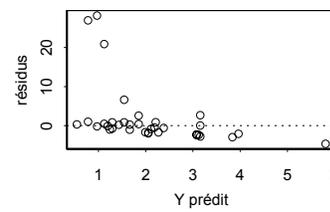
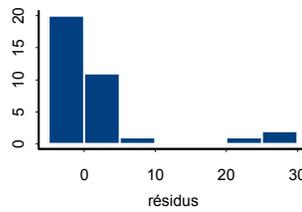
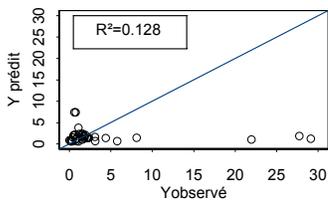
(Chou-fleur, 144Ce+144Pr)



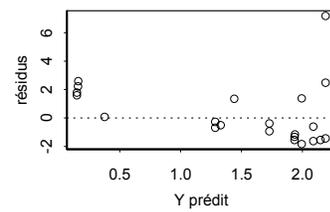
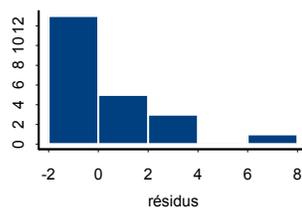
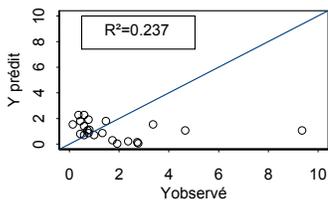
(Chou-fleur, 141Ce)



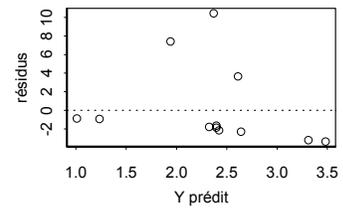
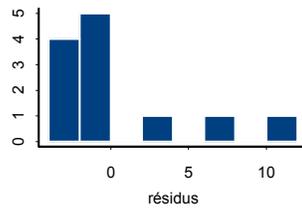
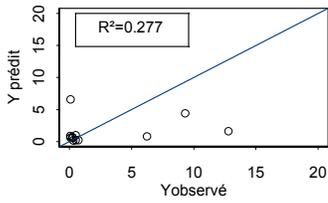
(Poireau, 95Zr+95Nb)



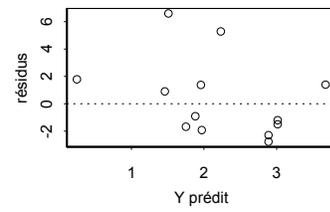
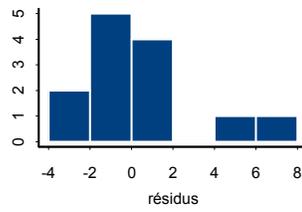
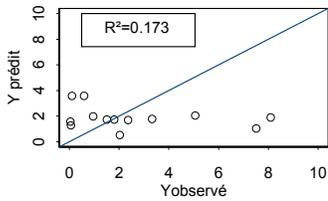
(Poireau, 144Ce+144Pr)



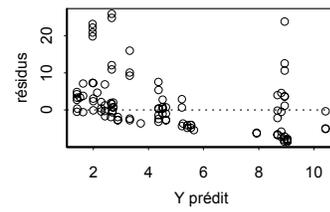
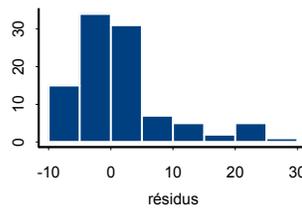
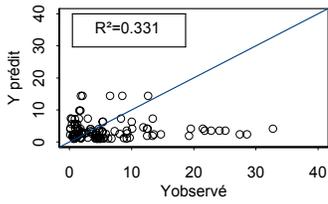
(Poireau, 141Ce)



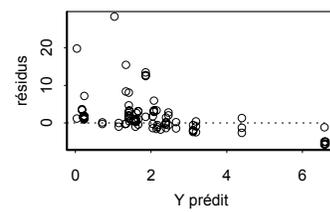
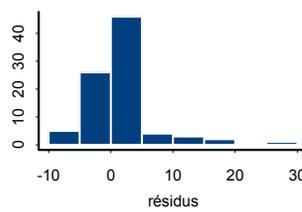
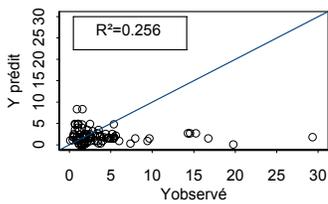
(Poireau, 106Ru+106Rh)



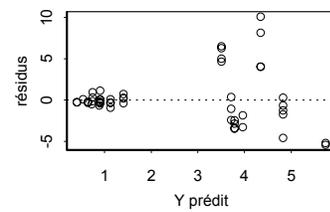
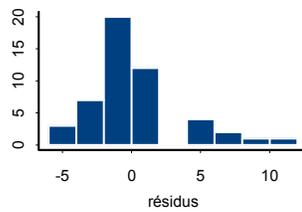
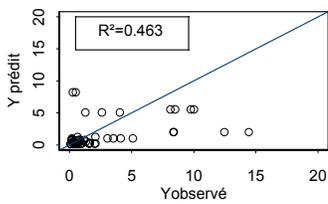
(Salade, 95Zr+95Nb)



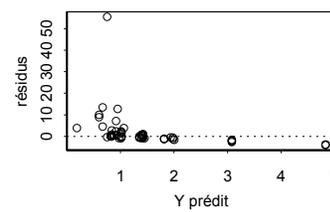
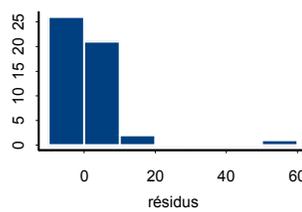
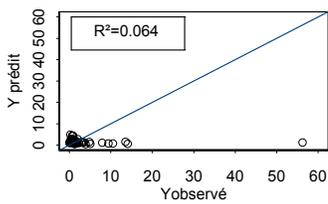
(Salade, 144Ce+144Pr)



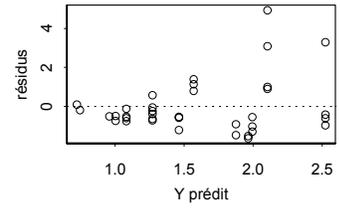
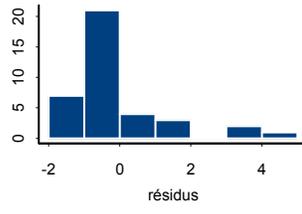
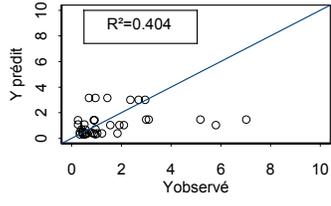
(Salade, 141Ce)



(Salade, 106Ru+106Rh)



(Salade, 103Ru)



ANNEXE H : Méthode des moindres carrés séparables

Reprenons l'équation 6 :

$$y_i = ax_i + bz_i[c] + \varepsilon_i \quad \text{pour } i = 1, \dots, n$$

où

y_i est l'observation i de la variable réponse y ,

x_i est l'observation i de la variable explicative x ,

$z_i[c]$ est l'observation i de la variable $z[c]$ (qui dépend de c),

a , b et c sont trois paramètres inconnus à estimer,

ε_i est l'erreur ou le résidu.

Cette équation est non linéaire et a une structure particulière, son écriture matricielle est la suivante :

$$Y = X\delta + \varepsilon$$

où

$$Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix}, \quad X = \begin{pmatrix} x_1 & z_1(c) \\ \vdots & \vdots \\ x_n & z_n(c) \end{pmatrix}, \quad \delta = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad \varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{pmatrix}$$

La méthode des moindres carrés séparables consiste à éliminer le premier ensemble de paramètres qui décrit le modèle de manière linéaire : les paramètres a et b sont estimés par la méthode des moindres carrés ordinaire (en fonction de c) :

$$\hat{\delta} = \begin{pmatrix} \hat{a}(c) \\ \hat{b}(c) \end{pmatrix} = (X'X)^{-1} X'Y$$

sous réserve que la matrice $(X'X)^{-1}$ soit inversible.

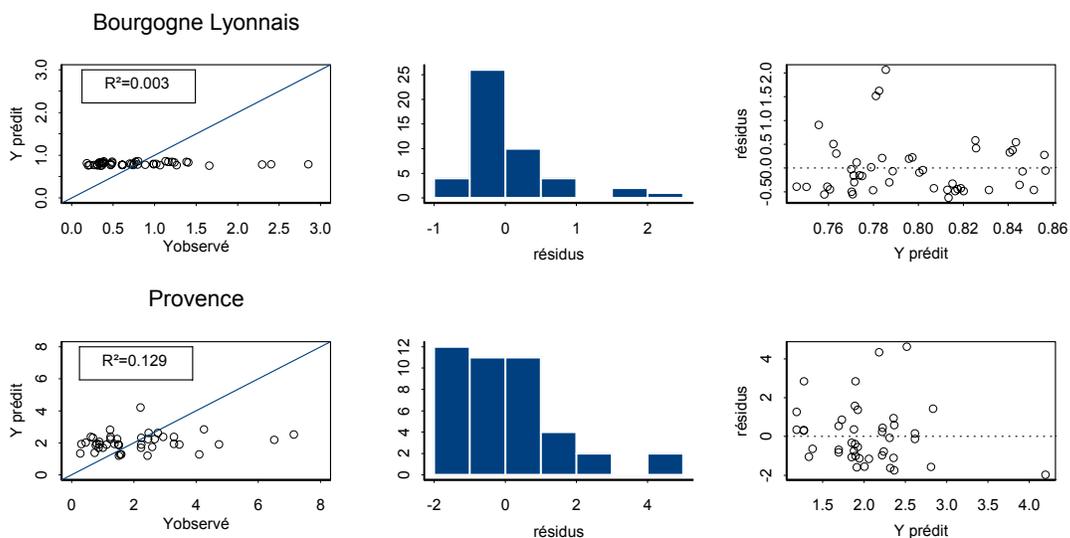
Cela permet d'obtenir une équation qui ne dépend plus que du paramètre c . Il suffit alors de rechercher la valeur de ce paramètre qui minimise la quantité :

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{a}(c)x_i - \hat{b}(c)z_i(c))^2$$

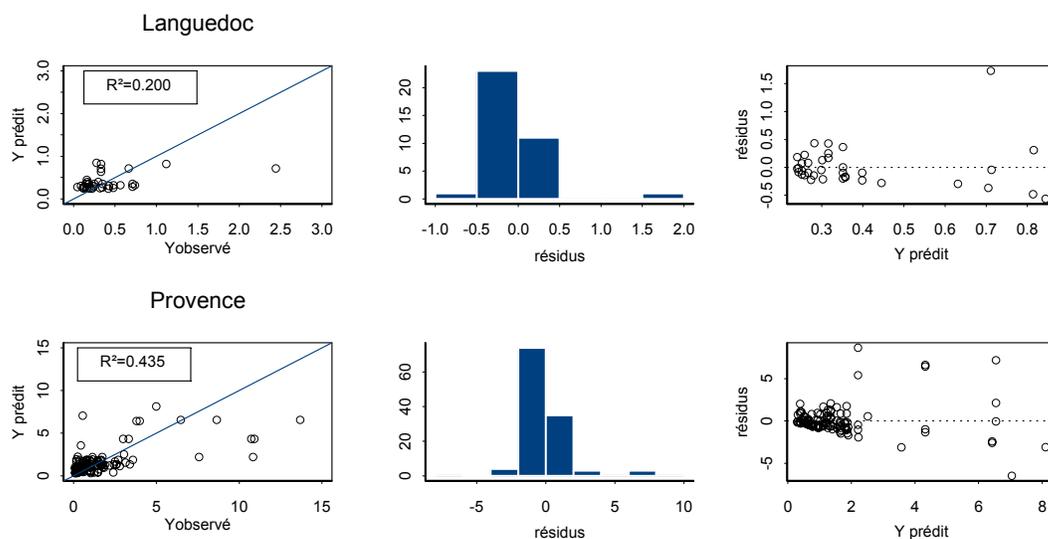
Puis de déduire les valeurs de a et b .

ANNEXE I : Représentations graphiques relatives à l'estimation des trois paramètres R_c , FT_r et λ_s : valeurs prédites en fonction des valeurs observées, histogramme des résidus et représentation des résidus en fonction des valeurs prédites pour l'ensemble des triplets étudiés.

Chou, ^{90}Sr

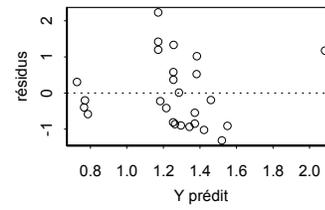
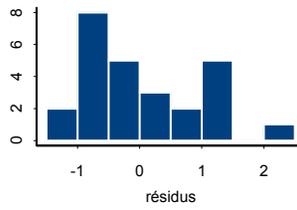
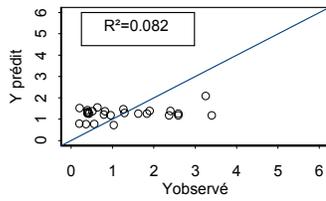


Chou, ^{137}Cs



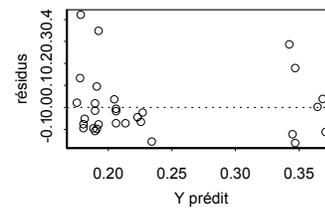
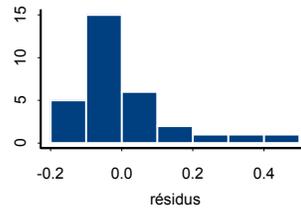
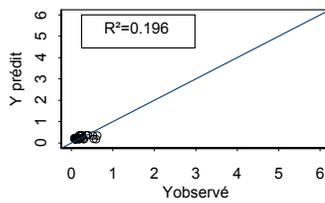
Chou-fleur, ⁹⁰Sr

Provence

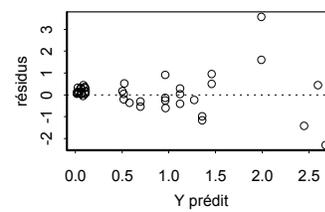
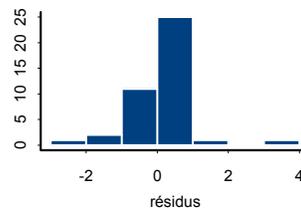
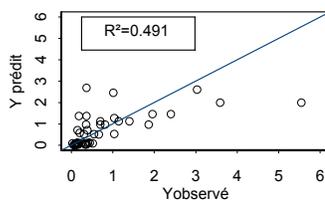


Chou-fleur, ¹³⁷Cs

Languedoc

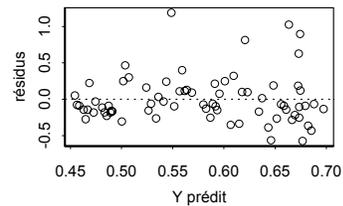
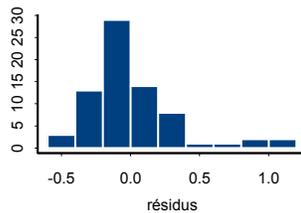
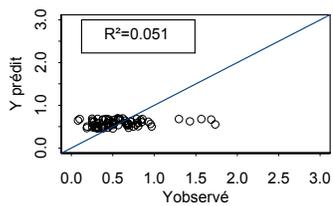


Provence

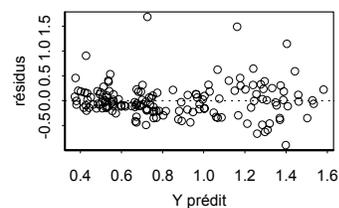
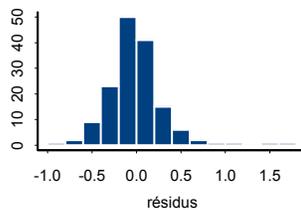
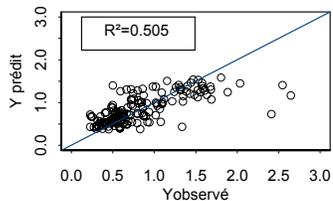


Salade, ⁹⁰Sr

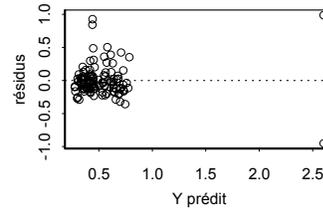
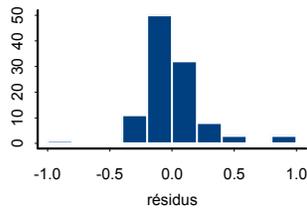
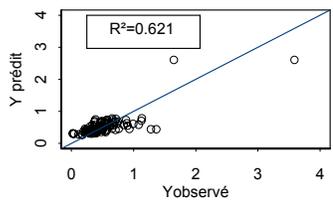
Bourgogne et Lyonnais



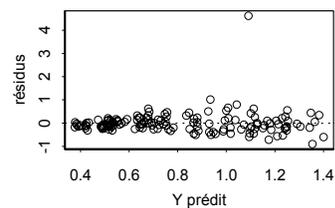
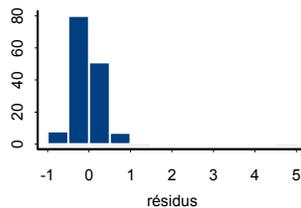
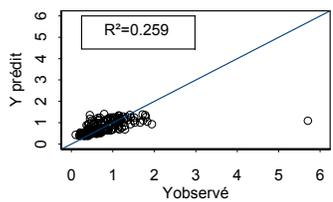
Bretagne



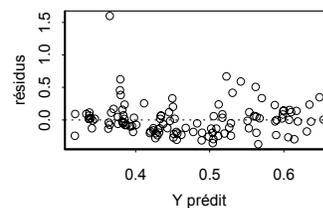
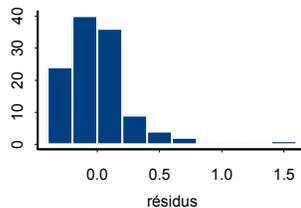
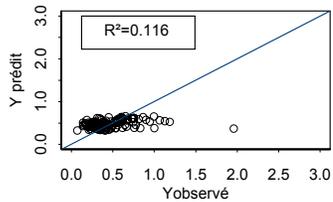
Cote d'Azur



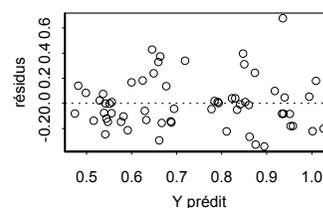
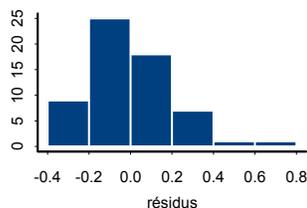
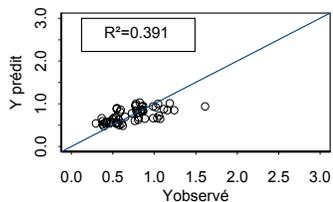
Garonne



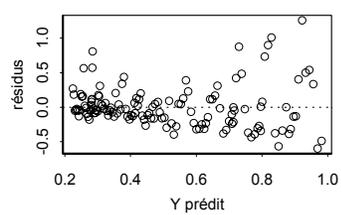
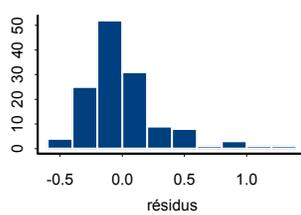
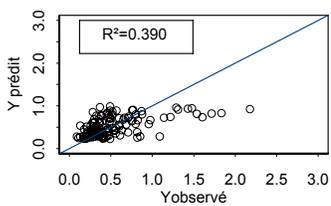
Languedoc



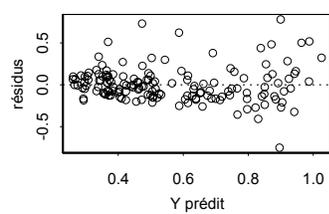
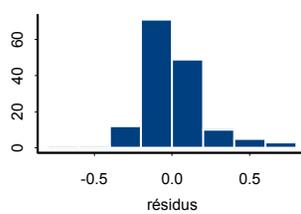
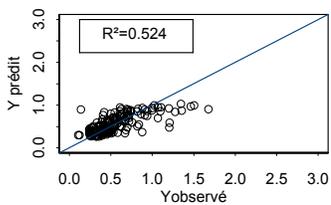
Lorraine



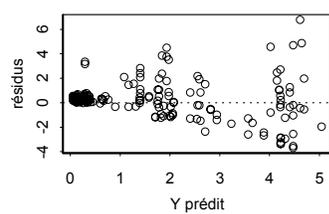
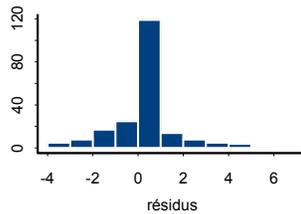
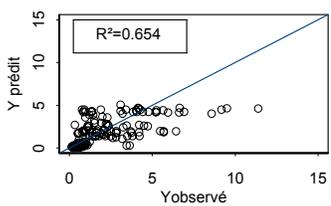
Nord



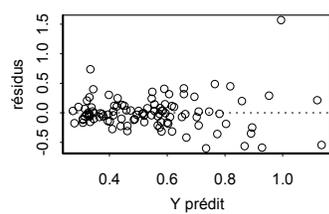
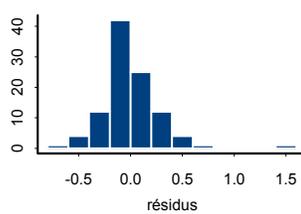
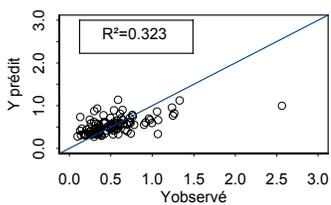
Paris



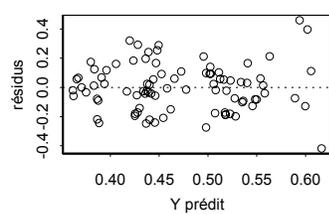
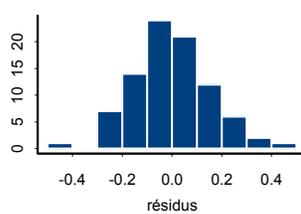
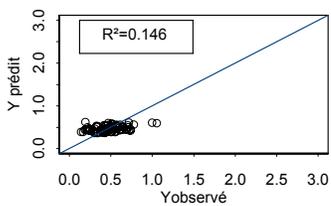
Provence



Roussillon

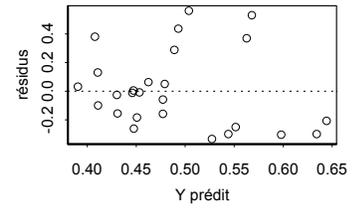
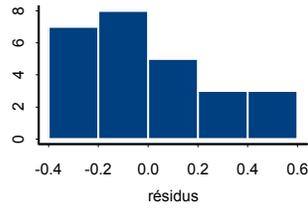
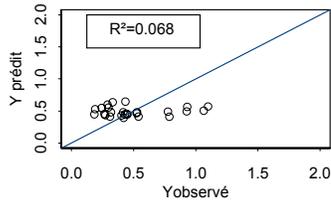


Val de Loire

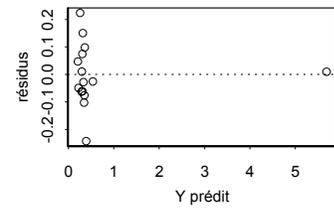
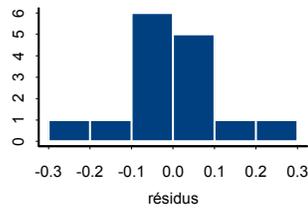
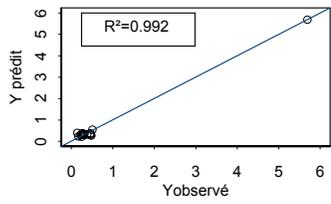


Salade, ¹³⁷Cs

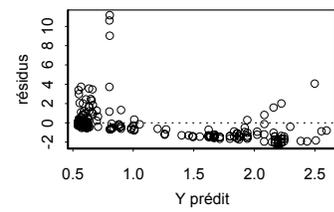
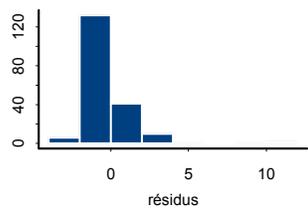
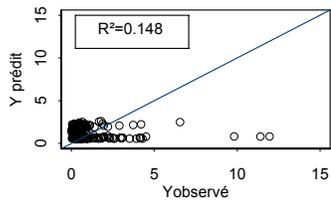
Bretagne



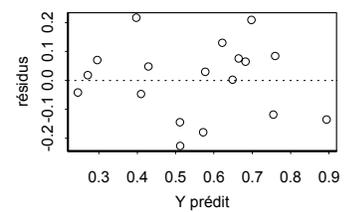
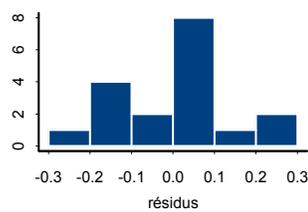
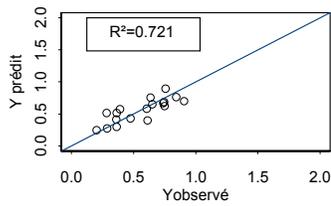
Cote d'Azur



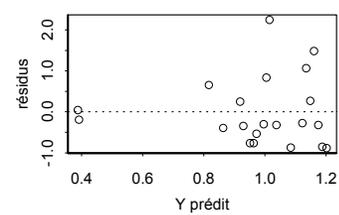
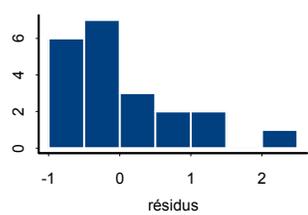
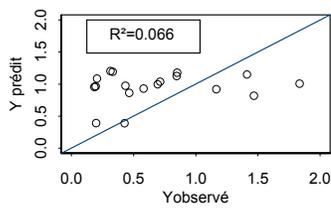
Languedoc



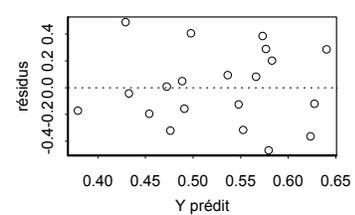
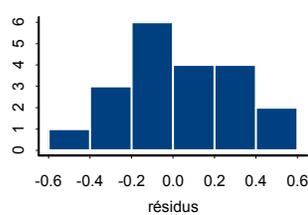
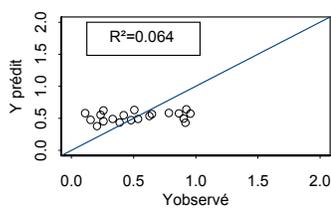
Lorraine



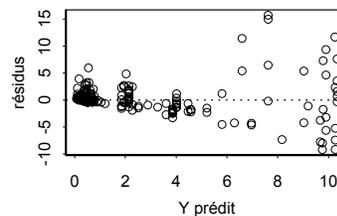
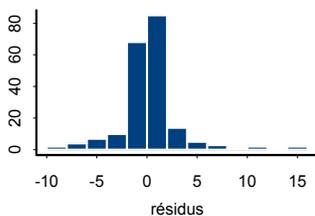
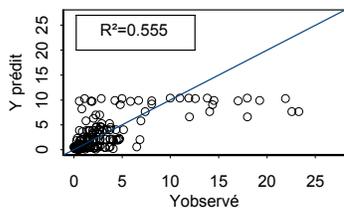
Nord



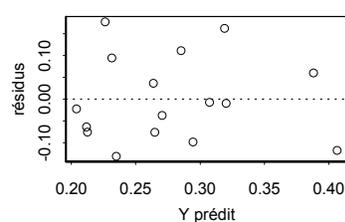
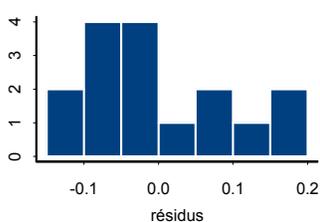
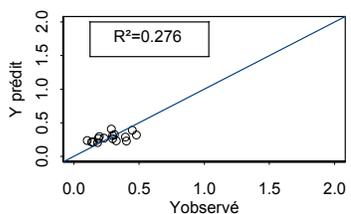
Paris



Provence

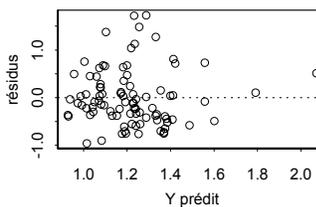
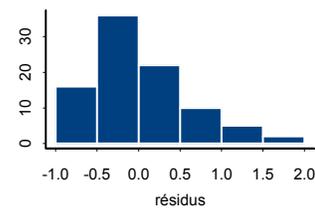
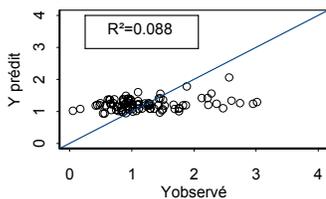


Roussillon

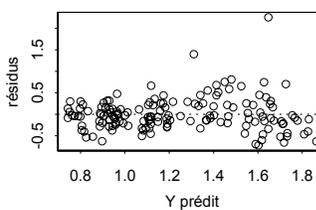
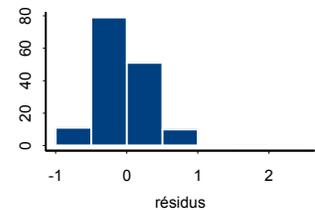
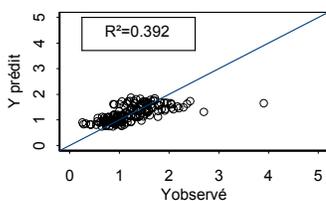


Poireau, ⁹⁰Sr

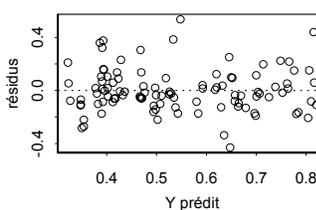
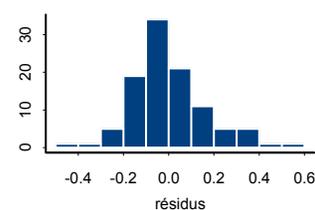
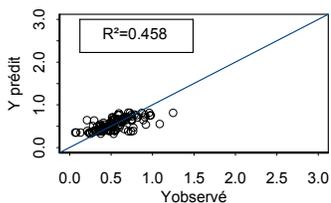
Bourgogne et Lyonnais



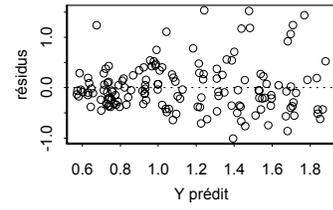
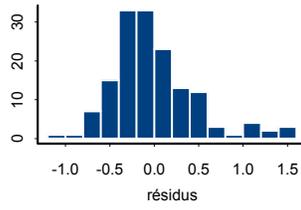
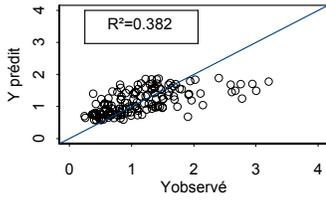
Bretagne



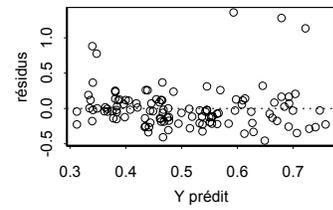
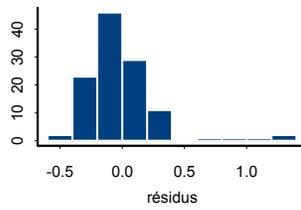
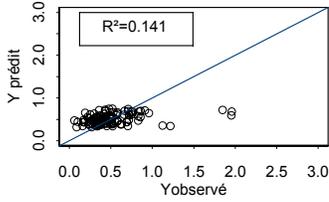
Cote d'Azur



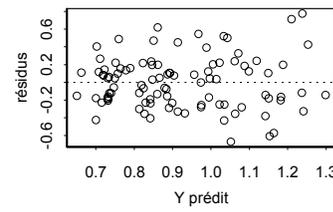
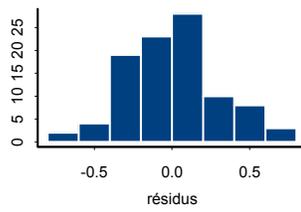
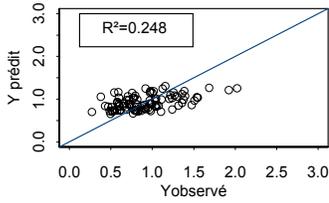
Garonne



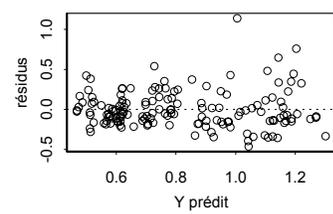
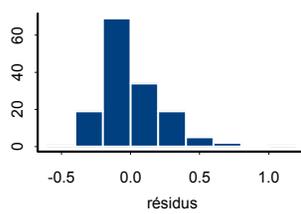
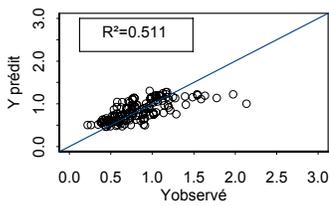
Languedoc



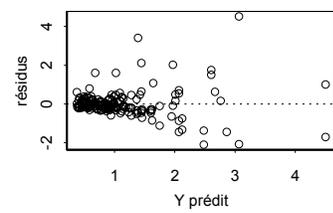
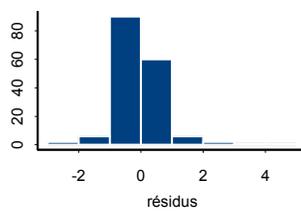
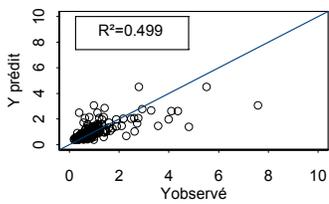
Lorraine



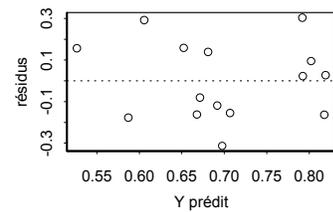
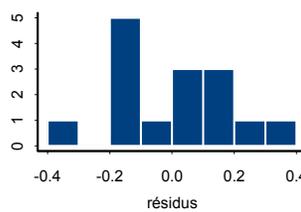
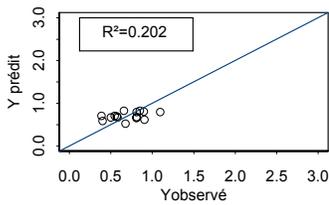
Paris



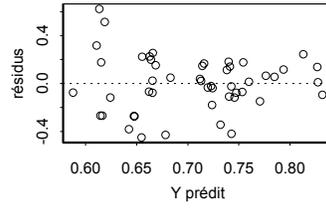
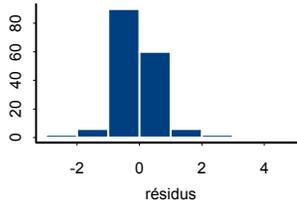
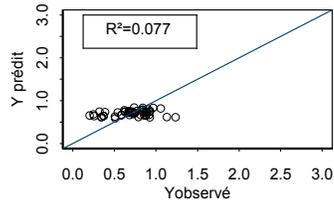
Provence



Roussillon

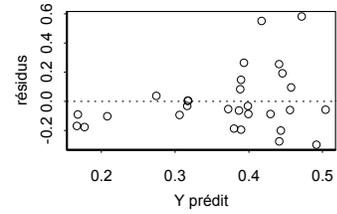
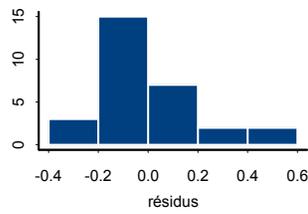
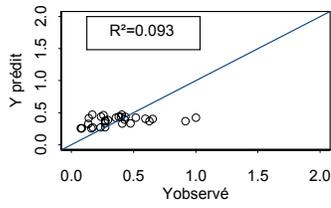


Val de Loire

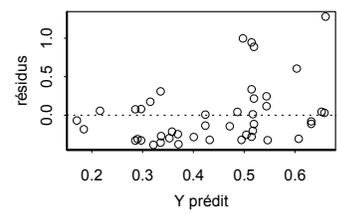
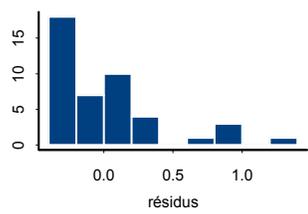
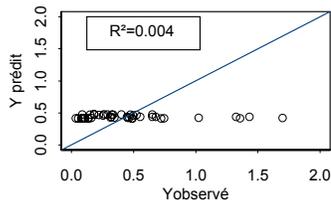


Poireau, ¹³⁷Cs

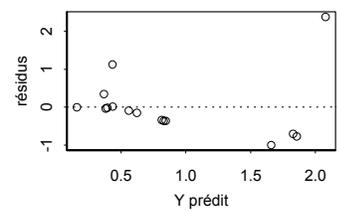
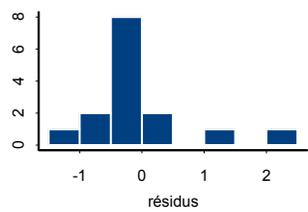
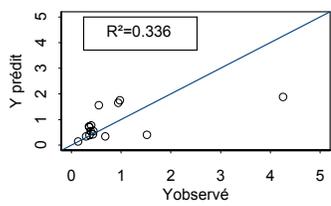
Garonne



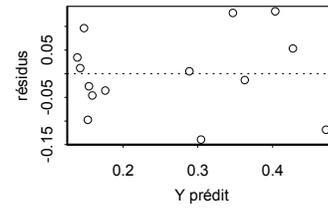
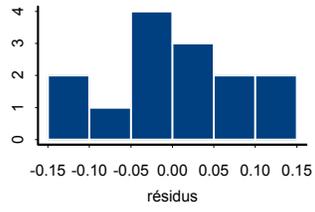
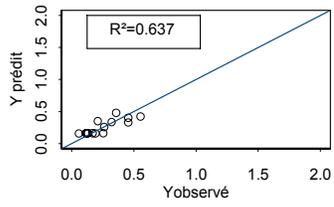
Languedoc



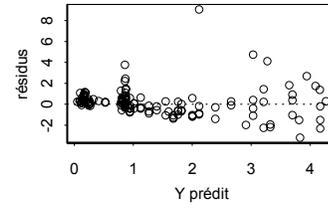
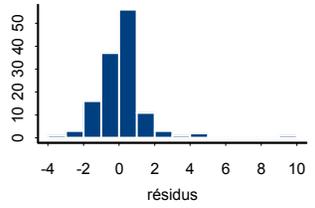
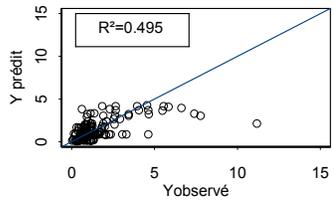
Lorraine



Paris



Provence



ANNEXE J : Estimations des trois paramètres radioécologiques de l'équation de la contamination des végétaux à partir des séries de données supplémentaires sur le rendement cultural pour le poireau (dépôt sec et dépôt humide confondus)

Disposant d'une série de données supplémentaires pour le légume poireau, de nouvelles estimations ont été effectuées. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 1.

	^{90}Sr				^{137}Cs			
	R_c	FT_r	T_s	E	R_c	FT_r	T_s	E
Bourgogne Lyonnais	0,20	0,18	28,46	30,87	-	-	-	-
Bretagne	0,14	0,25	12,08	22,44	-	-	-	-
Cote d'Azur	0,03	0,13	10,86	2,71	-	-	-	-
Garonne	0,04	0,30	7,71	33,87	2,29E-04	0,04	14,58	1,25
Languedoc	0,09	0,09	15,84	9,84	2,11E-12	0,04	2,60E+10	6,83
Lorraine	0,08	0,16	16,02	8,07	0,42	1,18	0,45	9,30
Nord	0,14	0,09	14,91	2,84	-	-	-	-
Paris	0,13	0,19	10,55	8,11	1,09E-06	0,06	6,79	0,09
Provence	0,12	0,16	10,81	88,44	0,02	1,72	0,42	248,71
Roussillon	0,04	0,22	4,06	0,49	-	-	-	-
Val de Loire	0,11	0,11	43,24	2,52	-	-	-	-

Tableau 1 : Estimations régionales des trois paramètres pour le légume-feuille « poireau » et les radionucléides ^{90}Sr et ^{137}Cs à partir du jeu de données supplémentaires sur les rendements culturaux

Les différentes valeurs estimées ont été comparées. Les valeurs du facteur de transfert racinaire et de la période de décroissance du radionucléide biodisponible dans le sol sont pratiquement identiques à celles trouvées dans le paragraphe 4.2.2. Les plus grandes variations s'observent pour le rapport de captation, les valeurs obtenues étant légèrement inférieures aux précédentes, comme il peut être constaté sur la Figure 1, où les valeurs estimées du rapport de captation sont comparées pour les mesures de ^{90}Sr .

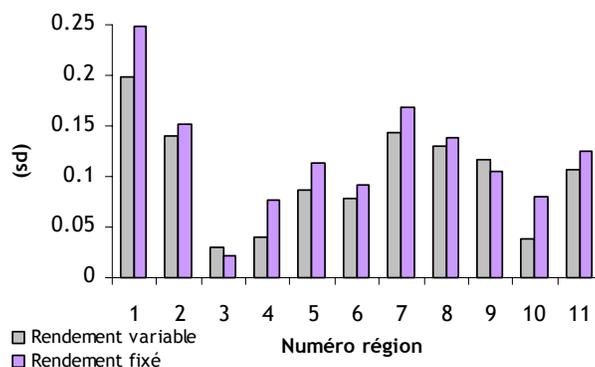
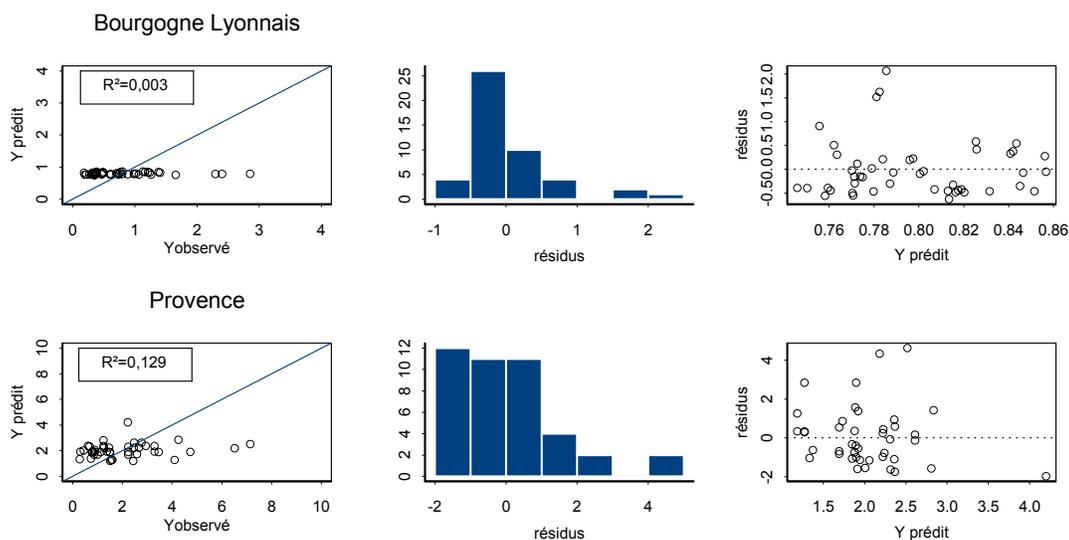


Figure 1 : Comparaison des valeurs estimées du rapport de captation par les différentes séries de données disponibles sur les rendements pour le couple (poireau, ^{90}Sr)

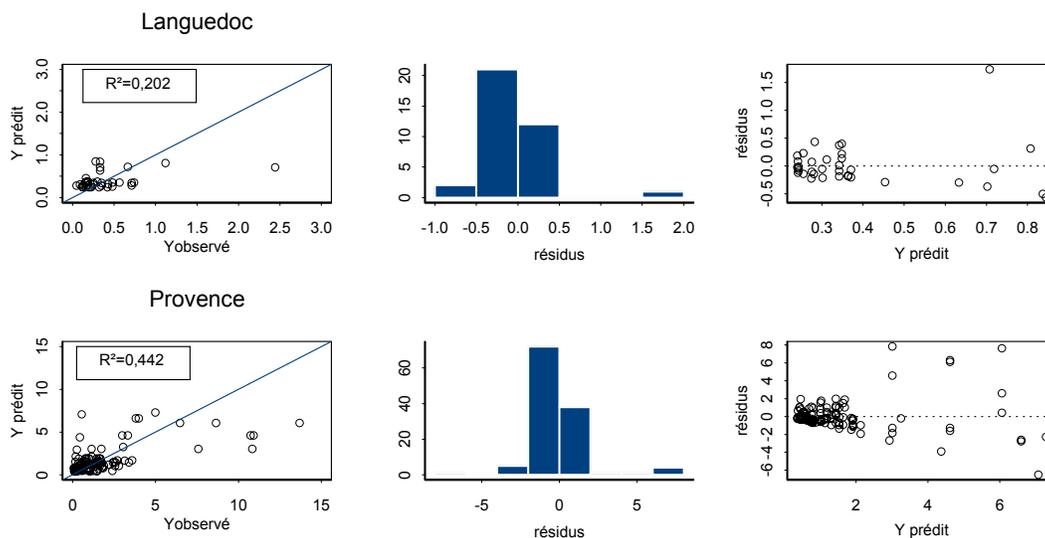
Les valeurs prédites ont été comparées aux valeurs observées. Les résultats graphiques, étant similaires aux précédents, ne seront pas présentés. La conclusion est donc identique à celle du paragraphe 3.5 : vu qu'il n'y a aucune amélioration dans la prédiction, nous nous contenterons des premières données acquises sur le rendement.

ANNEXE K : Représentations graphiques relatives à l'estimation des quatre paramètres $R_{c,sec}$, $R_{c,hum}$, FT_r et λ_s : valeurs prédites en fonction des valeurs observées, histogramme des résidus et représentation des résidus en fonction des valeurs prédites pour l'ensemble des triplets étudiés.

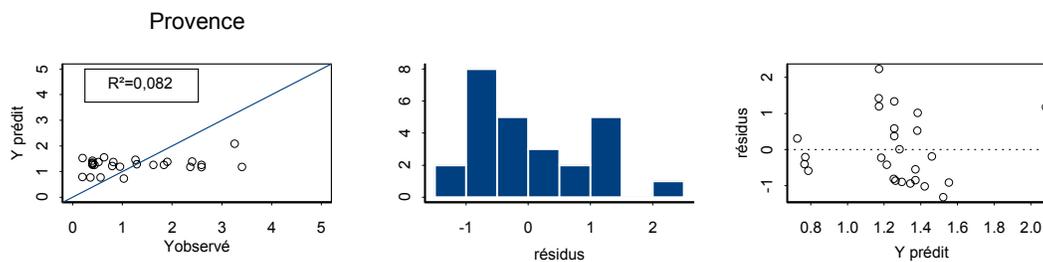
Chou, ^{90}Sr



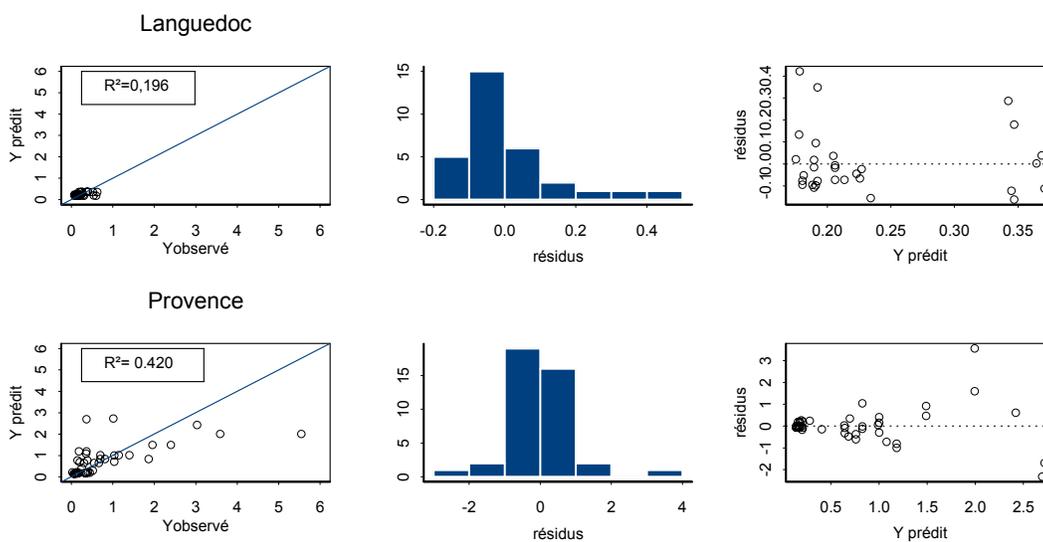
Chou, ^{137}Cs



Chou-fleur, ⁹⁰Sr

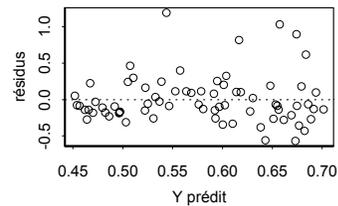
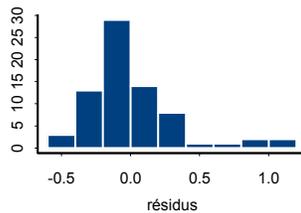
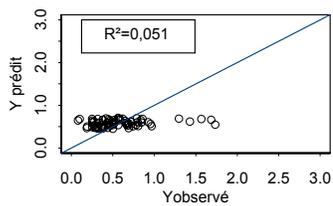


Chou-fleur, ¹³⁷Cs

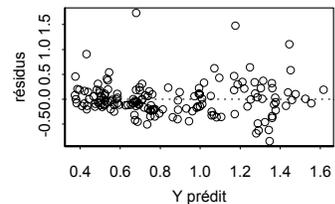
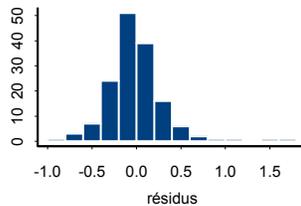
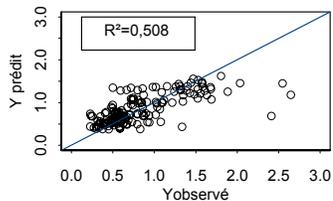


Salade, ⁹⁰Sr

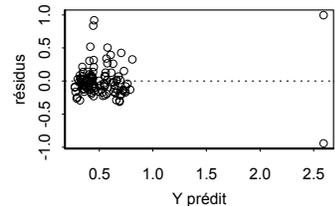
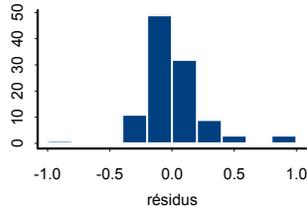
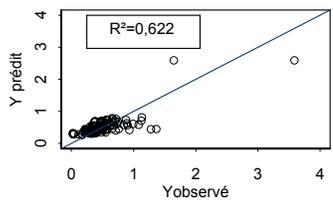
Bourgogne Lyonnais



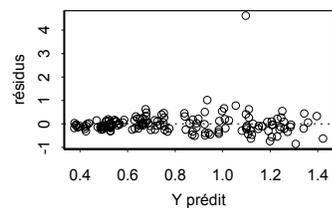
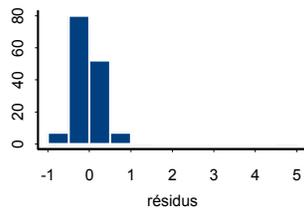
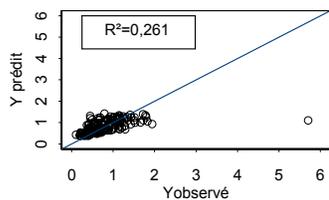
Bretagne



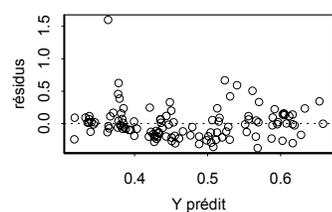
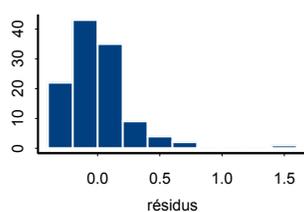
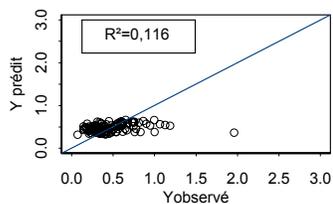
Cote d'Azur



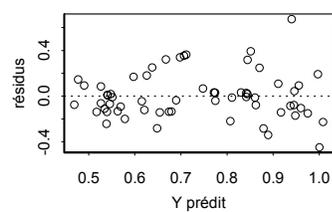
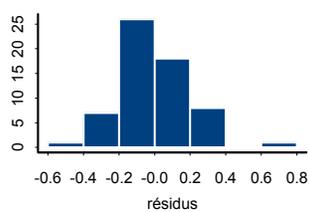
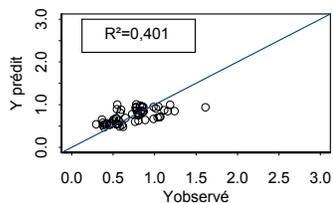
Garonne



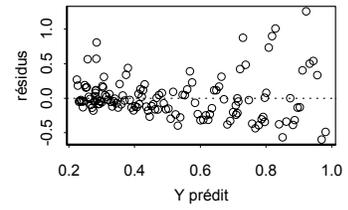
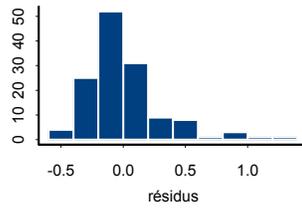
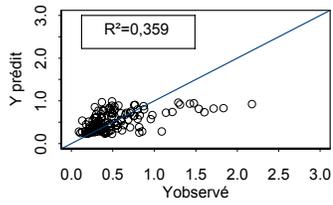
Languedoc



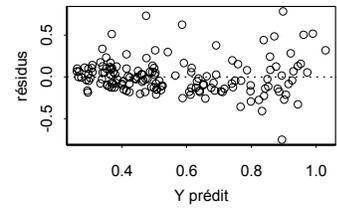
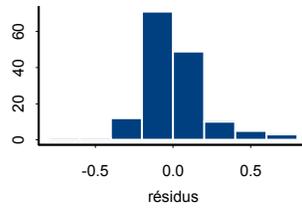
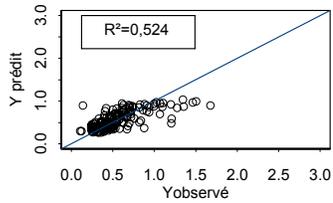
Lorraine



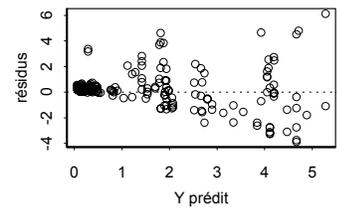
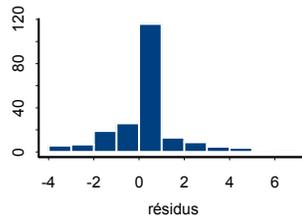
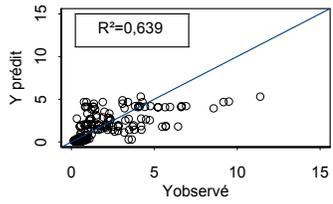
Nord



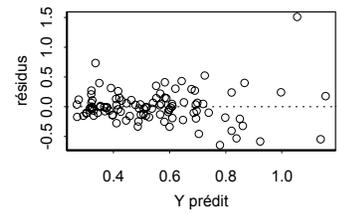
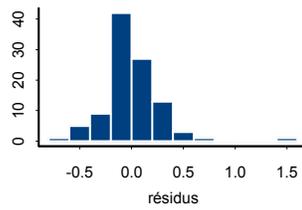
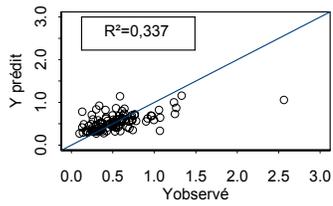
Paris



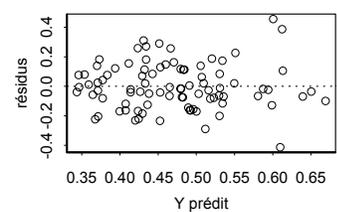
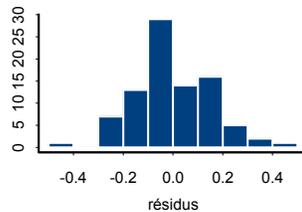
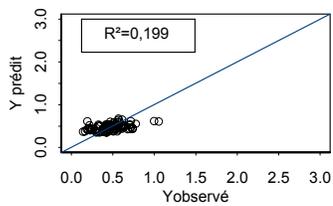
Provence



Roussillon

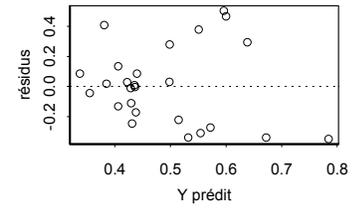
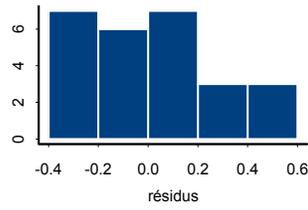
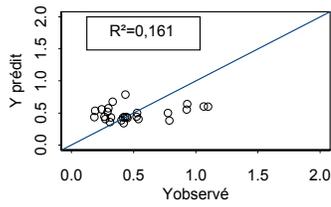


Val de Loire

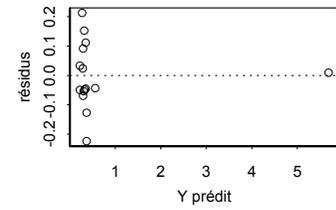
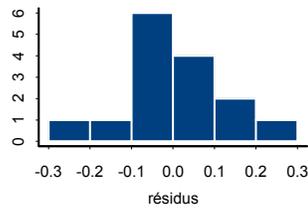
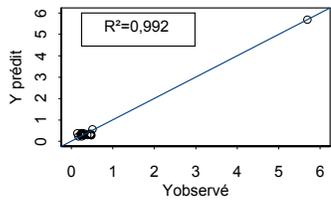


Salade, ¹³⁷Cs

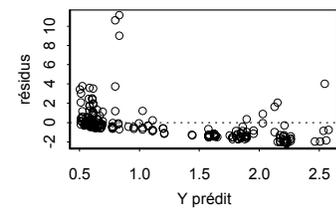
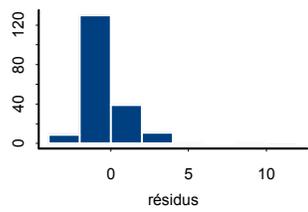
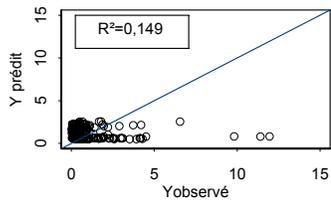
Bretagne



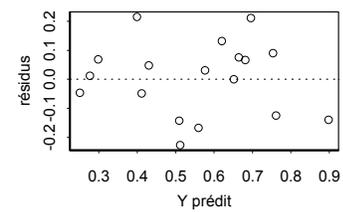
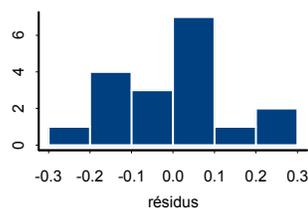
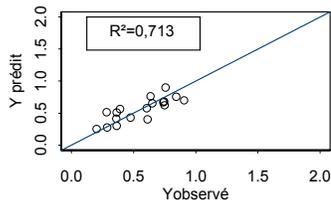
Cote d'Azur



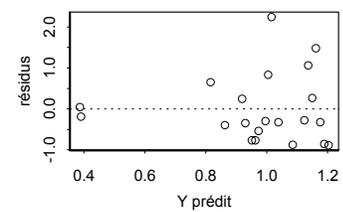
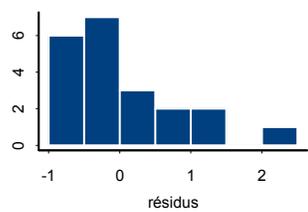
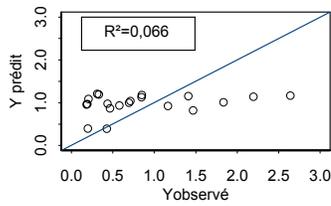
Languedoc



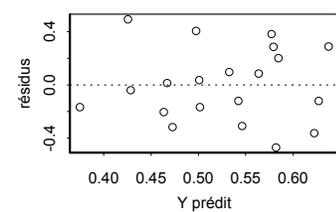
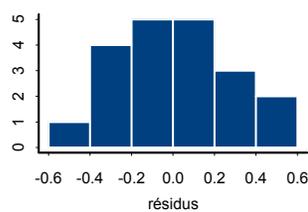
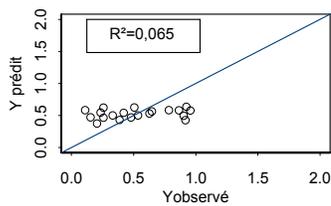
Lorraine



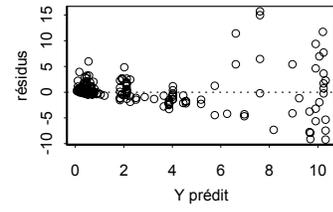
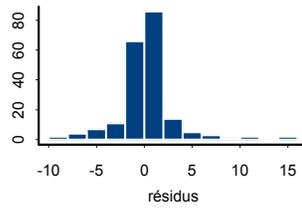
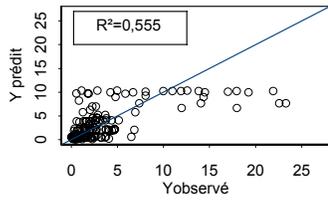
Nord



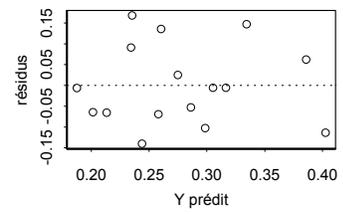
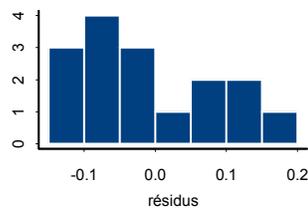
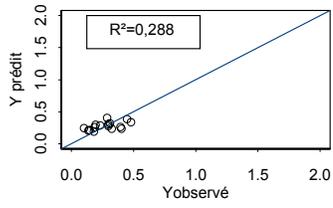
Paris



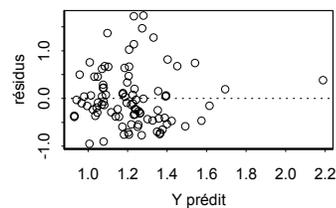
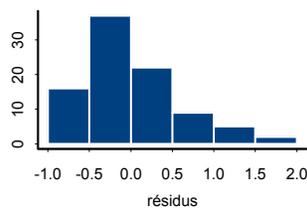
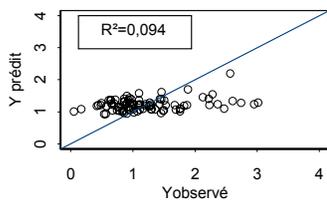
Provence



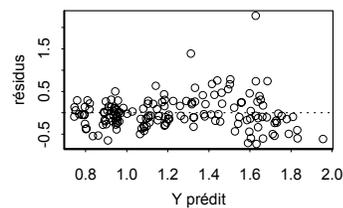
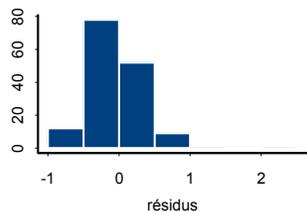
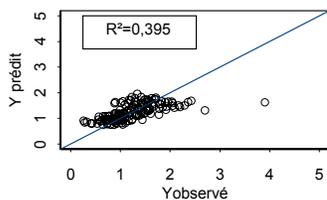
Roussillon



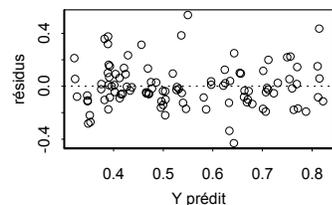
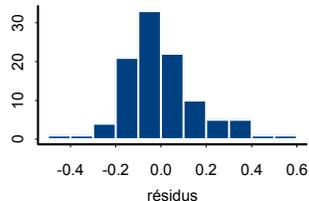
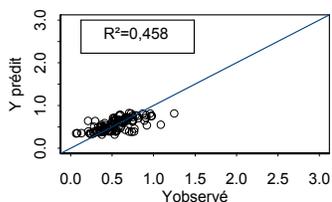
Bourgogne Lyonnais



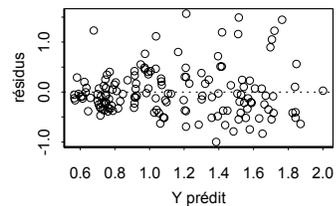
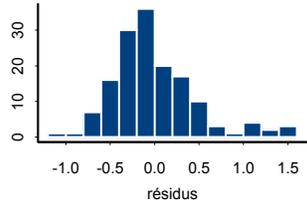
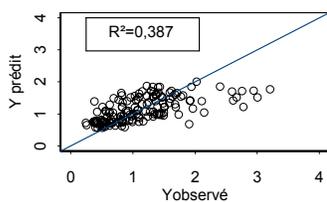
Bretagne



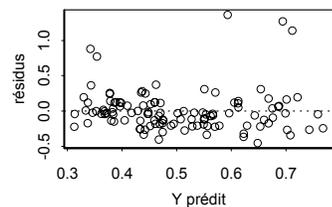
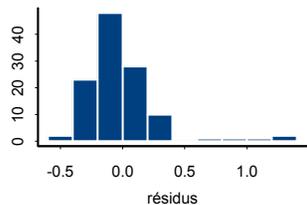
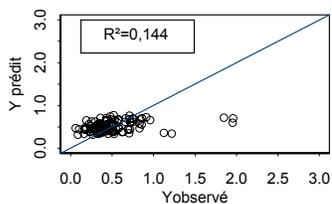
Cote d'Azur



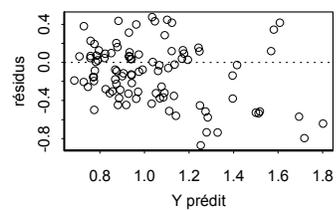
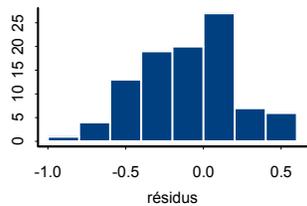
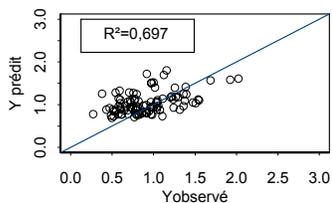
Garonne



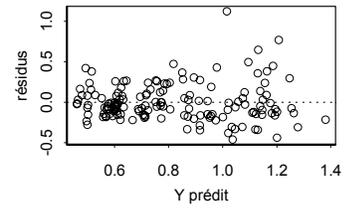
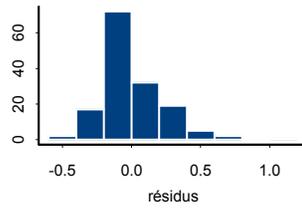
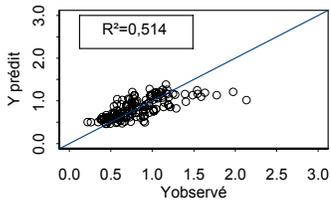
Languedoc



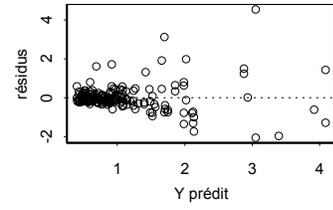
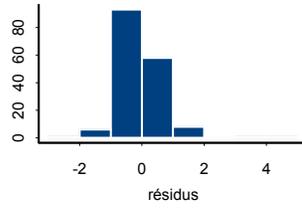
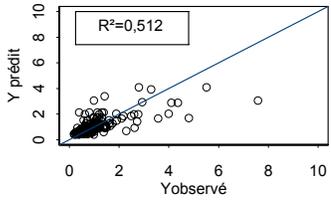
Lorraine



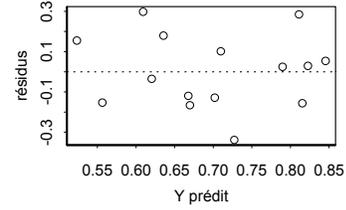
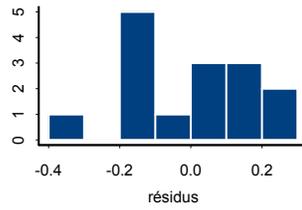
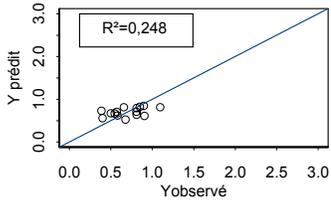
Paris



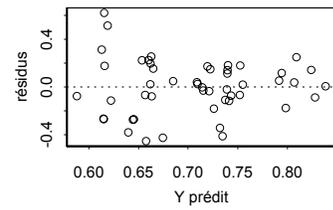
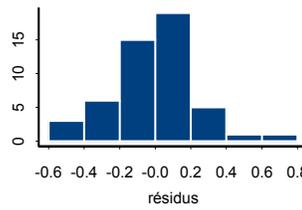
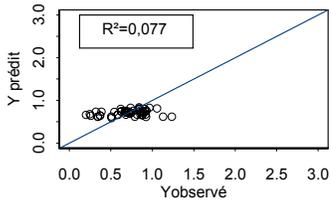
Provence



Roussillon

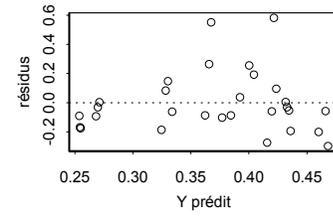
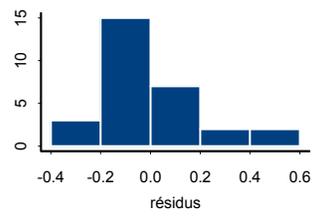
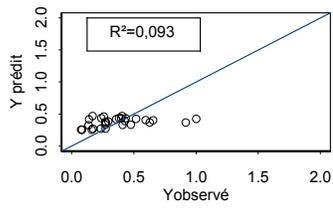


Val de Loire

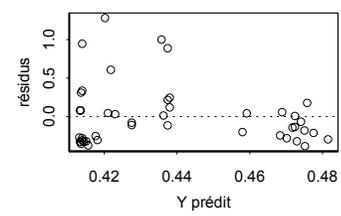
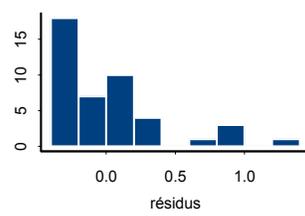
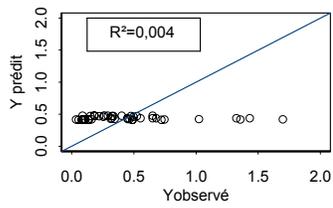


Poireau, ¹³⁷Cs

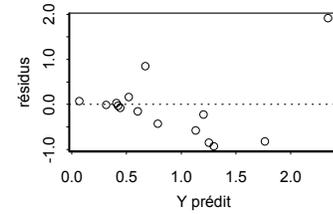
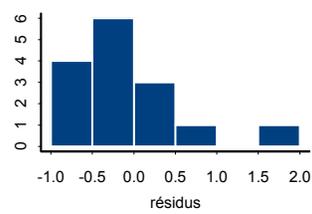
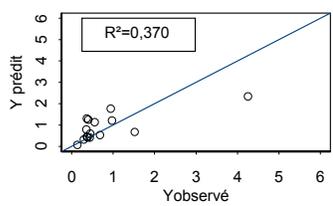
Garonne



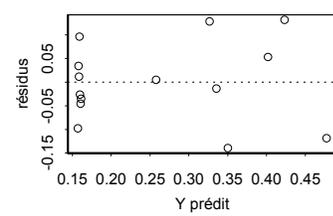
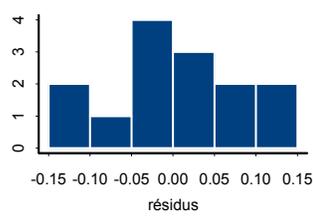
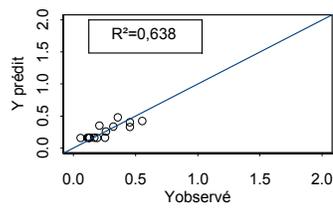
Languedoc



Lorraine



Paris



Provence

