
Gestion de l'incertitude
associée aux interpolations
dans le cadre d'un SIG d'alerte précoce
contre les pullulations du Criquet
migrateur malgache,
Locusta migratoria capito (Saussure, 1884)

Mémoire de stage

2008

Jean-Baptiste Borot

Master Cartographie et gestion des espaces à fortes contraintes
Université de Nantes

Organisme d'accueil : CIRAD



CIRAD-DIST
Unité bibliothèque
Lavalette



000103663

REMERCIEMENTS

Il est difficile de résumer en quelques mots tous les remerciements dus. C'est « parmi d'autres choses » qu'il me faut ici évoquer ma reconnaissance pour un certain nombre de protagonistes de ce stage.

Ces remerciements s'adressent en premier lieu à :

Monsieur Michel Lecoq, responsable de l'UPR Ecologie et maîtrise des populations d'acridiens, pour m'avoir octroyé ce stage, pour sa confiance, pour son suivi régulier de mon travail, et pour ses conseils. C'est tout particulièrement à lui que je souhaite adresser mes remerciements pour l'ensemble des apprentissages tirés de mon séjour au sein de l'unité.

Monsieur Stephan Gaillard, directeur de stage pour l'Université de Nantes, pour son suivi attentif malgré l'évolution du sujet et surtout malgré la distance.

Monsieur Jean-François Duranton, expert senior du projet, pour son érudition, sa surveillance des travaux et sa rigueur vigilante, ses enseignements, et sa patience à mon égard.

Mademoiselle Aurélia Decherf, expert junior du projet, pour sa parfaite et salutaire maîtrise des différents logiciels utilisés, ses multiples coups de pouce, et sa gentillesse.

Monsieur Alex Franc, chercheur, pour ses corrections féroces et appliquées, l'attention portée à la bibliographie, et l'aide apportée.

Madame Laurence Schmitt, coordinatrice administrative, pour sa diligence et pour avoir toujours veillé à faciliter mon séjour.

Inévitablement, des remerciements de groupe s'adressent à l'ensemble des membres de l'unité et aux diverses personnes de passage dans ses murs pour leur sympathie et leurs aides diverses. Une pensée particulière s'adresse à Antoine Foucart, My-Hanh Luong, Christine Pages, Mohammed Abdellahi Ould Babah, et Eva Schultner.

Enfin, des remerciements profonds s'adressent à mes parents et à mes frères pour leur soutien et leur affection. Une pensée particulière s'adresse à mon frère Olivier.

SIGLES ET ABREVIATIONS UTILISES

AD : Aire de Densation

AG : Aire Grégarigène

AGT : Aire Grégarigène Transitoire

AMI : Aire de Multiplication Initiale

ATM : Aire Transitoire de Multiplication

BAD : Banque Africaine de Développement

CIRAD : Centre International de Recherche en Agronomie pour le Développement

CNA : Centre National Anti-acridien de Madagascar

GA : Geostatistical Analyst

POP : Plage Optimale Pluviométrique

PSEM : Prediction Standard Error Map, carte d'incertitude

SIG : Système d'Information Géographique

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
1. CONTEXTE DE L'ETUDE ET PROBLEMATIQUE DE L'INCERTITUDE	3
1.1. GEOGRAPHIE ET BIO-ECOLOGIE DU CRIQUET MIGRATEUR A MADAGASCAR.....	3
1.1.1. Stades et phases	3
1.1.2. L'aire grégarigène, les conditions de déclenchement des invasions, et les bases du principe de l'alerte précoce	4
1.1.3. Contexte climatique sur l'aire grégarigène	7
1.2. LE SIG CRIQUET MIGRATEUR : PRINCIPES ET DONNEES D'ENTREE	8
1.2.1. Croisement de trois couches d'information	8
1.2.2. Le pas de temps	8
1.2.3. Les données d'entrée	8
1.2.3.1. Données statiques : la cartographie des biotopes	8
1.2.3.2. Données dynamiques : pluviométrie et état des populations acridiennes.....	8
1.2.4. Notions de potentiels et diagnostic du risque.....	13
1.2.4.1. Le potentiel écologique.....	13
1.2.4.2. Le potentiel acridien.....	13
1.2.4.3. L'évaluation du risque	14
1.3. L'INTERPOLATION DE DONNEES PONCTUELLES ET L'EVALUATION DE L'INCERTITUDE ASSOCIEE	15
1.3.1. L'interpolation de données ponctuelles	15
1.3.2. Distinction méthodes déterministes et méthodes géostatistiques.....	15
1.3.2.1. Méthodes déterministes.....	15
1.3.2.2. Méthodes géostatistiques	16
1.3.3. Principes généraux des méthodes géostatistiques.....	17
1.3.3.1. Différentes variantes du krigeage.....	17
1.3.3.2. Semivariogramme expérimental et modèle variographique	17
1.3.3.3. Pépite (nugget), palier (sill), et portée (range)	19
1.3.4. Evaluation et spatialisation de l'incertitude dans les méthodes géostatistiques.....	20
1.3.4.1. Principe.....	20
1.3.4.2. Contraintes pour l'exploitation des cartes d'incertitude.....	22
1.4. LOGICIEL UTILISE	22
2. OBJECTIFS ET METHODOLOGIE	23
2.1. OBJECTIFS DES TRAVAUX	23
2.2. METHODOLOGIE POUR LA SELECTION D'UNE METHODE D'INTERPOLATION PREFERENTIELLE	23
2.2.1. Les critères de performance considérés	23
2.2.2. Les méthodes testées :	24
2.2.2.1. Pour l'évaluation de la précision des méthodes géostatistiques en comparaison de la méthode de l'inverse de la distance	24
2.2.2.2. Pour la sélection d'une méthode géostatistique préférentielle.....	24
2.2.3. Comment évaluer les performances des méthodes ? Le test de validation croisée	25
2.2.3.1. Principe.....	25
2.2.3.2. Résultats obtenus	25
2.2.4. Exploitation des résultats obtenus au test de validation croisée.....	29
2.2.4.1. Concernant la précision de l'interpolation	29
2.2.4.2. Concernant la fiabilité de l'estimation de l'incertitude	29
2.2.4.3. Hiérarchisation de la sélection	29
2.2.5. Les jeux de données utilisés :	30
2.2.5.1. Pour l'interpolation des données pluviométriques	30
2.2.5.2. Pour l'interpolation des données acridiennes	32
2.3. METHODOLOGIE POUR LA DETERMINATION DE RESEAUX MINIMAUX DE COLLECTE DE L'INFORMATION SUR LE TERRAIN	34
2.3.1. Cas des données pluviométriques	34
2.3.1.1. L'exploitation des polygones de Thiessen	34
2.3.1.2. Les seuils d'incertitude minimaux et optimaux.....	36
2.3.2. Cas des données acridiennes.....	36
2.4. METHODOLOGIE POUR LA REALISATION DE L'OUTIL « QUALITEDIAGNOSTIC »	38

3. RESULTATS	39
3.1. LA SELECTION D'UNE METHODE D'INTERPOLATION PREFERENTIELLE	39
3.1.1. Performances des méthodes géostatistiques sur le plan de la précision des interpolations	39
3.1.1.1. Résultats généraux.....	39
3.1.1.2. L'importance du modèle variographique et des options choisies	40
3.1.1.3. Conséquences opérationnelles.....	40
3.1.2. Identification de paramétrages interopérables quel que soit le jeu de données pour chaque couche d'information.....	40
3.1.2.1. Pour les données pluviométriques	40
3.1.2.2. Pour les données acridiennes	43
3.1.2.3. Qualité de l'extrapolation : la remise en cause des performances de l'interpolation	52
3.2. DEFINITION D'UN RESEAU MINIMAL POUR LA COLLECTE DE L'INFORMATION PLUVIOMETRIQUE	52
3.3. LA BOITE A OUTILS « QUALITE DIAGNOSTIC »	57
CONCLUSION	65
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	67

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 : PHOTOGRAPHIES DU CRIQUET MIGRATEUR.....	69
ANNEXE 2 : EXPERIMENTATION DU SIG SUR LA ZONE PILOTE D'EJEDA.....	73
ANNEXE 3 : TUTORIEL DESCRIPTIF DES MENUS ET FENETRES POUR L'EXPLOITATION DE LA BARRE D'OUTILS GEOSTATISTICAL ANALYST (ARCGIS 9.2).....	75
ANNEXE 4 : GRAPHIQUES UTILISES POUR LA SELECTION D'UNE METHODE D'INTERPOLATION PREFERENTIELLE.....	93
ANNEXE 5 : GRAPHIQUES UTILISES POUR LA DETERMINATION D'UN RESEAU MINIMAL DE COLLECTE DE L'INFORMATION PLUVIOMETRIQUE.....	115
ANNEXE 6 : MODE D'EMPLOI POUR L'OUTIL QUALITEDIAGNOSTIC.....	123

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : LES PHASES DU CRIQUET MIGRATEUR	3
FIGURE 2 : CARTE DES AIRES DE GREGARISATION DU CRIQUET MIGRATEUR MALGACHE.....	6
FIGURE 3 : SAISON DES PLUIES ET SAISON SECHE DANS LE SUD-OUEST DE MADAGASCAR.....	7
FIGURE 4 : ISOHYETES MOYENS ANNUELS (BATTISTINI 1971)	7
FIGURE 5 : CARTE DES STATIONS ACRIDIENNES ET PRINCIPAUX SECTEURS DE PROSPECTION	10
FIGURE 6 : CARTE DES POSTES PLUVIOMETRIQUES	11
FIGURE 7 : QUANTITE D'INFORMATION PLUVIOMETRIQUE COLLECTEE CHAQUE MOIS SUR LE TERRAIN	12
FIGURE 8 : NIVEAU DE GREGARITE EN FONCTION DE LA PROPORTION D'INDIVIDUS SOLITAIRES, TRANSIENS OU GREGAIRES	13
FIGURE 9 : SEMIVARIOGRAMME EXPERIMENTAL TEL QU'IL APPARAIT AU SEIN DU LOGICIEL ARCGIS ET DE SON MODULE GEOSTATISTICAL WIZARD.....	18
FIGURE 10 : CONSTRUCTION DU SEMIVARIOGRAMME : DISTANCE ET DIFFERENCE DE VALEURS AU SEIN DE CHAQUE COUPLE DE POINTS.....	18
FIGURE 11 : PEPITE (NUGGET), PALIER (SILL), ET PORTEE (RANGE) SUR LE MODELE VARIOGRAPHIQUE.....	19
FIGURE 12 : PRINCIPE DE L'ESTIMATION DE L'INCERTITUDE BASEE SUR LA VARIANCE ENTRE LE SEMIVARIOGRAMME ET LE MODELE VARIOGRAPHIQUE.....	21
FIGURE 13 : EXEMPLE DE CARTE D'INCERTITUDE POUR UNE INTERPOLATION DE VALEURS PLUVIOMETRIQUES (MARS 2005).....	21

FIGURE 14 : AFFICHAGE DES RESULTATS OBTENUS AU TEST DE VALIDATION CROISEE DANS LE MODULE GEOSTATISTICAL WIZARD (1)	27
FIGURE 15 : AFFICHAGE DES RESULTATS OBTENUS AU TEST DE VALIDATION CROISEE DANS LE MODULE GEOSTATISTICAL WIZARD (2)	28
FIGURE 16 : TABLE DATABASE (.DBF) DES RESULTATS INDIVIDUALISES POUR LE TEST DE VALIDATION CROISEE ..	28
FIGURE 17 : CARTES DE REPARTITION DES VALEURS DE PLUVIOMETRIE SUR LES JEUX DE DONNEES TESTES	31
FIGURE 18 : CARTE DE REPARTITION DES VALEURS DE PLUVIOMETRIE SUR LES DONNEES SUPPLEMENTAIRES DE SEPTEMBRE 2006	32
FIGURE 19 : CARTE DE REPARTITION DES POTENTIELS ACRIDIENS SUR LES JEUX DE DONNEES TESTES	33
FIGURE 20 : MAILLAGE DE L'ESPACE PAR LES PLUVIOMETRES DE TERRAIN SUR LES JEUX DE DONNEES DE DECEMBRE 2006, MARS 2005, JUILLET 2002, ET NOVEMBRE 2006	35
FIGURE 21 : FENETRE DU MODEL BUILDER D'ARCGIS PERMETTANT DE PROGRAMMER UNE SUITE D'OPERATIONS SUR LES DONNEES	38
FIGURE 22 : CARTES DES VALEURS PLUVIOMETRIQUES RELEVES, DES ISOHYETES, ET DE L'INCERTITUDE ASSOCIEE A L'INTERPOLATION POUR LE MOIS DE DECEMBRE 2006	46
FIGURE 23 : CARTES DES VALEURS PLUVIOMETRIQUES RELEVES, DES ISOHYETES, ET DE L'INCERTITUDE ASSOCIEE A L'INTERPOLATION POUR LE MOIS DE MARS 2005	47
FIGURE 24 : CARTES DES VALEURS PLUVIOMETRIQUES RELEVES, DES ISOHYETES, ET DE L'INCERTITUDE ASSOCIEE A L'INTERPOLATION POUR LE MOIS DE JUILLET 2002	48
FIGURE 25 : CARTES DES VALEURS DE POTENTIEL ACRIDIEN RELEVES, DES ISOPOTENTIELS ACRIDIENS, ET DE L'INCERTITUDE ASSOCIEE A L'INTERPOLATION POUR LE MOIS DE DECEMBRE 2006	49
FIGURE 26 : CARTES DES VALEURS DE POTENTIEL ACRIDIEN RELEVES, DES ISOPOTENTIELS ACRIDIENS, ET DE L'INCERTITUDE ASSOCIEE A L'INTERPOLATION POUR LE MOIS DE MARS 2005	50
FIGURE 27 : CARTES DES VALEURS DE POTENTIEL ACRIDIEN RELEVES, DES ISOPOTENTIELS ACRIDIENS, ET DE L'INCERTITUDE ASSOCIEE A L'INTERPOLATION POUR LE MOIS DE SEPTEMBRE 2006	51
FIGURE 28 : CARTE DES SURFACES SUR LESQUELLES PEUT ETRE GARANTIE UNE INCERTITUDE ACCEPTABLE POUR L'INTERPOLATION DES DONNEES PLUVIOMETRIQUES SI L'ENSEMBLE DES POSTES PLUVIOMETRIQUES DISPONIBLES FOURNISSENT DES RELEVES	55
FIGURE 29 : CARTES DES VALEURS PLUVIOMETRIQUES RELEVES, DES ISOHYETES, ET DE L'INCERTITUDE ASSOCIEE A L'INTERPOLATION POUR LES DONNEES SUPPLEMENTAIRES DU MOIS DE NOVEMBRE 2006 UTILISEES	56
FIGURE 30 : L'OUTIL QUALITE DIAGNOSTIC	57
FIGURE 31 : FENETRE DE LANCEMENT DE L'APPLICATION "AUDITDONNEES"	58
FIGURE 32 : STOCKAGE DES RESULTATS DE L'APPLICATION "AUDITDONNEES"	59
FIGURE 33 : TABLE "RESULTAT_AUDITDONNEESMTO"	59
FIGURE 34 : TABLE "RESULTAT_AUDITDONNEESACRI"	59
FIGURE 35 : FENETRE DE LANCEMENT DE L'APPLICATION "CARTESINCERTITUDE"	60
FIGURE 36 : STOCKAGE DES RESULTATS DE L'APPLICATION "CARTESINCERTITUDE"	60
FIGURE 37 : FENETRE DE LANCEMENT DE L'APPLICATION "FINALISATIONCARTESINCERTITUDE"	61
FIGURE 38 : STOCKAGE DES RESULTATS DE L'APPLICATION "FINALISATIONCARTESINCERTITUDE"	61
FIGURE 39 : STOCKAGE DE LA SYMBOLOGIE DE REFERENCE POUR LA SUPERPOSITION DES CARTES D'INCERTITUDE A LA CARTE DE RISQUE	62
FIGURE 40 : SYMBOLOGIE DE REFERENCE POUR LA SUPERPOSITION DES CARTES D'INCERTITUDE A LA CARTE DE RISQUE	62
FIGURE 41 : L'OUTIL QUALITE DIAGNOSTIC DANS L'ARBORESCENCE ARCCATALOG	63

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1: INCIDENCE DE LA PLUVIOMETRIE MENSUELLE SUR LE CRIQUET MIGRATEUR	4
TABLEAU 2 : POTENTIEL ACRIDIEN EN FONCTION DES DENSITES ET DU NIVEAU DE GREGARITE DES POPULATIONS	14
TABLEAU 3 : DETERMINATION DES NIVEAUX DE RISQUE ACRIDIEN EN FONCTION DES POTENTIELS ACRIDIEN ET ECOLOGIQUE	14
TABLEAU 4 : BESOINS MINIMAUX EN INFORMATION ACRIDIENNE, POUR CHAQUE SECTEUR ET PAR SAISONS	37

Introduction

Le Criquet migrateur malgache, *Locusta migratoria capito* (Saussure, 1884), est un acridien gégariapte, c'est-à-dire qu'il a la capacité à passer de la phase solitaire, où il vit isolé, à la phase grégaire, où il vit en groupe (bandes larvaires ou essaims). On parle de transformation phasaire. Elle se fait progressivement (en deux ou trois générations) et sous l'influence de la densité. Elle entraîne de profondes modifications morphologiques, anatomiques, pigmentaires, comportementales, et bio-écologiques. On distingue trois phases : solitaire, *transiens* (en transition) et grégaire (Duranton *et al.* 1982).

Si en phase solitaire le criquet migrateur est inoffensif, en phase grégaire les criquets forment des essaims et des bandes larvaires pouvant s'étendre sur plusieurs kilomètres ravageant l'agriculture malgache, et particulièrement déstabilisant pour les systèmes vivriers. Ces essaims se forment dans le sud du pays au sein d'une région appelée aire grégarigène (185 000 km²), mais peuvent ensuite coloniser l'ensemble du territoire malgache à la recherche de conditions environnementales favorables à leur développement. On parle alors d'invasions et celles-ci peuvent durer plusieurs années.

La dernière invasion de 1997 à 2000 a démontré l'acuité de la menace. Les $\frac{3}{4}$ de Madagascar ont été affectés, et, pour protéger l'agriculture locale, plus de 4 millions d'hectares ont dû être traités avec des insecticides chimiques et plus de 60 millions de dollars dépensés par la communauté internationale. Une intervention lors du démarrage de l'invasion, sur les essaims et bandes larvaires encore situés dans l'aire grégarigène ou même plus tôt, aurait considérablement facilité les opérations et surtout diminué les coûts, tant financiers qu'environnementaux (Duranton 2001). Cette invasion, ses dégâts, et ses coûts ont ainsi mis en lumière la nécessité de rénover les matériels et outils du Centre National Anti-acridien malgache afin de le doter des moyens nécessaires pour une lutte préventive visant à empêcher tout départ d'invasion.

Dans cet objectif et dans le cadre du projet PLPA (Projet de Lutte Préventive Antiacridienne) financé par la BAD (Banque Africaine de Développement) a été confié au CIRAD et à son unité « Ecologie et maîtrise des populations d'acridiens » la réalisation d'un outil d'aide à la décision de type SIG (Système d'Information Géographique) visant à localiser de manière précoce les zones propices aux pullulations du Criquet migrateur et ainsi éviter toute transformation phasaire (ou pour le moins stopper dans l'œuf toutes les augmentations menaçantes de densité), donc tout départ d'invasion.

Les facteurs bio-écologiques à l'origine de la naissance des invasions sont déjà connus. Et bien que ceux-ci soient divers et complexes, le facteur discriminant est le facteur hydrique. La quantité et la répartition des pluies déterminent les déplacements des criquets et leurs capacités de développement (Darnhofer & Launois 1974). Le premier système d'avertissement acridien malgache a d'ailleurs été créé sur ces bases en suivant mensuellement la pluviométrie pour repérer les zones à risque de pullulation. Mais puisque pour une même quantité de pluie, chaque biotope offre un potentiel de développement au Criquet migrateur différent, ce système d'avertissement simple peut aujourd'hui être amélioré en croisant la pluviométrie avec une carte des biotopes acridiens. Au total, le croisement de l'information sur les biotopes, de celle sur la pluviométrie, et de l'informations sur l'état des populations acridiennes, permet de déterminer et localiser les risques de pullulations aboutissant à la formation de grégaires. Un tel diagnostic permet d'organiser les opérations de lutte.

Une première expérimentation sur une surface limitée a permis de tester la faisabilité et l'efficacité d'un tel SIG (Andriamaroahina 2005). Les couches d'informations pluviométrique et acridienne sont acquises par interpolation de données relevées sur le terrain (données ponctuelles). L'aire grégarigène est ainsi maillée par un dispositif de pluviomètres et de stations acridiennes (points sur lesquels sont réalisés les prospections acridiennes : comptages pour évaluer la densité, échantillonnage pour la détermination de l'état phasaire et du stade phénologique).

Les travaux actuels du CIRAD visent à développer le SIG sur l'ensemble de l'aire grégarigène. L'essentiel des travaux repose sur la création d'une carte des biotopes acridiens concernant toute l'aire grégarigène. Parallèlement à ceci et en relation au caractère d'outil d'aide à la décision du SIG une réflexion a été engagée concernant l'incertitude associée au diagnostic de risque. C'est au sein de cette problématique visant à replacer le diagnostic établi dans un contexte de fiabilité et à lui associer des considérations de confiance dans les résultats que s'intègrent les travaux réalisés durant ce stage.

Le présent travail s'intéresse aux couches d'information pluviométrique et acridienne. L'interpolation des données ponctuelles est en effet source d'incertitude quant aux résultats. La démarche s'articule autour de la mesure de la précision de ces interpolations. Les objectifs poursuivis sont triples. Ils visent à disposer d'outils permettant d'estimer l'incertitude sur ces couches d'informations acquises par interpolation, à déterminer les moyens nécessaires pour garantir leur fiabilité, et à intégrer au SIG et à ses prévisions une évaluation de leur qualité.

En conséquence, le plan de ce mémoire s'organise en 3 parties avec tout d'abord la présentation du contexte technique du SIG, de la problématique de l'interpolation des données ponctuelles, et des outils disponibles pour tenter d'estimer l'incertitude associée aux résultats. La deuxième partie présente la méthodologie développée pour sélectionner une méthode d'interpolation et des paramétrages optimaux, pour identifier des réseaux minimaux de collecte de l'information capables de garantir une incertitude acceptable sur les couches d'information acquises par interpolation, et pour la réalisation et l'intégration au sein du SIG d'applications renseignant sur la qualité et la fiabilité des informations pluviométriques et acridiennes utilisées pour construire le diagnostic de risque de pullulation. La troisième partie présente les résultats.

1. Contexte de l'étude et problématique de l'incertitude

1.1. Géographie et bio-écologie du Criquet migrateur à Madagascar

1.1.1. Stades et phases

En tant qu'acridien grégariapte le Criquet migrateur peut passer d'une phase solitaire à une phase grégaire, et vice versa, sous l'influence de la densité. Le stade transiens¹ constitue l'étape intermédiaire (**voir figure 1**). Les différentes phases se caractérisent par d'importantes transformations allant de la morphologie au comportement² (voir photos en **Annexe 1**). En phase grégaire, les individus sont beaucoup plus résistants aux conditions écologiques adverses et également plus mobiles. De ce fait les populations grégaires peuvent coloniser des régions beaucoup plus étendues que les solitaires. Deux à trois générations sont nécessaires pour changer de phase. La densité à partir de laquelle la transformation phasaire est déclenchée, appelée seuil de grégariation, est chez le Criquet migrateur de l'ordre de 2000 ailés solitaires par hectare (Darnhofer & Launois 1974). Les populations grégaires groupées forment des bandes larvaires puis des essaims (**voir photos en Annexe 2**).

Les ravages causés par les grégaires sont particulièrement importants, pour l'agriculture comme pour les pâturages. Si de nombreuses formations grégaires apparaissent, une invasion peut démarrer. Les populations grégaires, de par leur mobilité, et leur tolérance aux conditions environnementales défavorables peuvent coloniser pratiquement toute la Grande Île. Il faut donc prévenir tôt ou stopper la formation des premiers regroupements grégaires pour éviter une invasion à grande échelle.

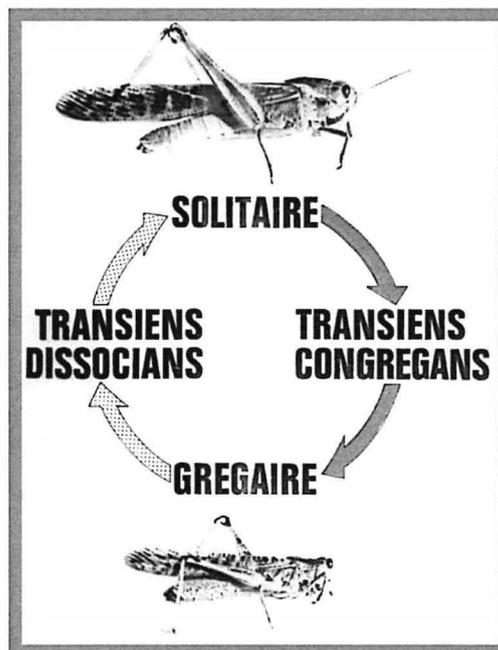


Figure 1 : les phases du Criquet migrateur

¹ On parle de transiens congrégans et de transiens dissocians en fonction du sens de la transformation phasaire.

² Les différences touchent à la fois la morphologie, la morphométrie, la pigmentation, l'anatomie, la physiologie, la biologie, l'écologie, et le comportement.

Les trois stades phénologiques d'un acridien au cours de sa vie sont : l'embryon, la larve, l'imago (insecte ailé) qui devient adulte à la maturation sexuelle. L'enchaînement de ces trois états au cours d'un cycle du Criquet migrateur peut s'étaler de 50 à 130 jours (en fonction des conditions environnementales).

1.1.2. L'aire grégarigène, les conditions de déclenchement des invasions, et les bases du principe de l'alerte précoce

Le Criquet migrateur vit la plupart du temps à l'état solitaire. Acridien mésophile, il apprécie les milieux ouverts des zones sèches du versant occidental de l'île. Son comportement est marqué par des migrations permanentes à plus ou moins grande échelle à la recherche de conditions favorables à son développement et à sa reproduction. Sous l'influence de conditions environnementales favorables et grâce à des déplacements à longue distance, les populations solitaires peuvent se regrouper, augmenter ainsi leur densité, et initier le processus de grégarisation.

Depuis les travaux de pionnier de Zolotarevsky (1929), les recherches ont abouti à une connaissance des conditions écologiques pouvant conduire à un départ d'invasion (Anonyme (FAO) 1973). Il a ainsi été mis en évidence que les invasions prenaient naissance au sein d'une zone appelée aire grégarigène et située dans le sud-ouest de l'île. Cette aire grégarigène présente plusieurs aires écologiquement complémentaires qui permettent à l'acridien solitaire de trouver des conditions favorables à son développement à tout moment de l'année (Launois 1974). Ces aires complémentaires sont de plus connectées entre elles par un réseau de voies privilégiées de déplacement (Duranton *et al.* 1979). L'aire grégarigène occupe près de 185 000 km² soit l'équivalent du tiers de la surface de Madagascar (**voir figure 2**).

La pluviométrie représente le facteur discriminant pour le développement des populations, leurs migrations, et le déclenchement des pullulations. La plage optimale pluviométrique (POP) a été définie entre 50 et 150 mm de pluie par mois (Andrianasolo Ravoavy 1979, Darnhofer & Launois 1974). En deçà le milieu est trop sec, au delà il est trop humide. Dans un cas comme dans l'autre, les populations, si elles le peuvent, ont tendance à fuir les zones défavorables et à se maintenir dans les régions concernées par la POP.

Tableau 1: incidence de la pluviométrie mensuelle sur le Criquet migrateur

Pluviométrie mensuelle	Conditions pour le Criquet migrateur
0-5 mm	Sub-létales
5-15 mm	Très défavorables
15-50 mm	Défavorables
50-150 mm	Optimales (POP)
150-250 mm	Défavorables
250-400 mm	Très défavorables
> 400 mm	Sub-létales

La réalisation moyenne de cette POP dans le temps et dans l'espace a permis de définir trois unités régionales dans l'aire grégarigène (**voir figure 2**) :

- l'Aire de Multiplication Initiale, AMI, (nord et nord-est de l'aire grégarigène), où se développe la première génération en début de saison des pluies (entre octobre et décembre). L'AMI peut également être exploitée durant la saison sèche (juin à septembre) comme zone refuge.
- l'Aire Transitoire de Multiplication, ATM, zone de transit pour les populations en provenance de l'AMI et en direction du Sud-Ouest sur le modèle de la progression de la saison des pluies ; elle est colonisée en début et en fin de saison des pluies.
- l'Aire de Densation, AD, à l'extrême sud-ouest de l'aire grégarigène, où s'effectue le plus souvent la transformation phasaire entre janvier et mars.
- une quatrième aire, périphérique, a récemment été dégagée, il s'agit de l'Aire Grégarigène Transitoire, AGT, exploitable par les *transiens* en période de recrudescence.

Chacune des aires est divisée en secteurs acridiens (Nord, Centre, et Sud) (**voir figure 2**).

La notion de plage optimale pluviométrique et l'ensemble des connaissances acquises ont permis le développement dans les années 1970 d'un système d'alerte précoce contre les invasions du Criquet migrateur à Madagascar reposant sur l'analyse combinée de la pluviosité et des caractéristiques des populations acridiennes (densité, phase, stade) observées dans l'aire grégarigène. Ce système a bien fonctionné pendant une vingtaine d'années, mais l'invasion de 1996 à 2000 a mis en évidence ses failles et notamment l'absence de moyens du Centre National Anti-acridien (CNA), incapable faute de crédits et avec un matériel obsolète de maîtriser les premières pullulations. Il s'agit maintenant de développer un SIG établissant mensuellement un diagnostic de risque de pullulations dangereuses sur la base des conditions environnementales et de l'état des populations du Criquet migrateur dans l'aire grégarigène. L'une des avancées majeures réside dans la possibilité, grâce aux progrès technologiques (micro-ordinateur et télédétection), de différencier dans l'espace les différents biotopes présents sur l'aire grégarigène. Car si certes le Criquet migrateur va se déployer dans les biotopes où la POP est réalisée (Lecoq 1995, 1975), chaque biotope va néanmoins exprimer un potentiel plus ou moins favorable avec une même quantité de pluie.

La finalité de ce SIG vise à doter le service anti-acridien de Madagascar (actuellement dénommé Centre National Antiacridien) des « instruments de décision objective pour mettre en œuvre une lutte préventive performante, mobilisant des moyens d'intervention adaptés à la gravité de chaque situation nécessitant une réduction significative des populations acridiennes, à l'échelle locale ou régionale » (Franc *et al.* 2004). « Le résultat opérationnel escompté reste l'évaluation et la localisation des risques acridiens en temps réel, afin de définir et ajuster, en toute connaissance de cause, la stratégie d'intervention permettant de maîtriser les pullulations acridiennes présentant un risque à court ou moyen terme » (Franc *et al.* 2004).

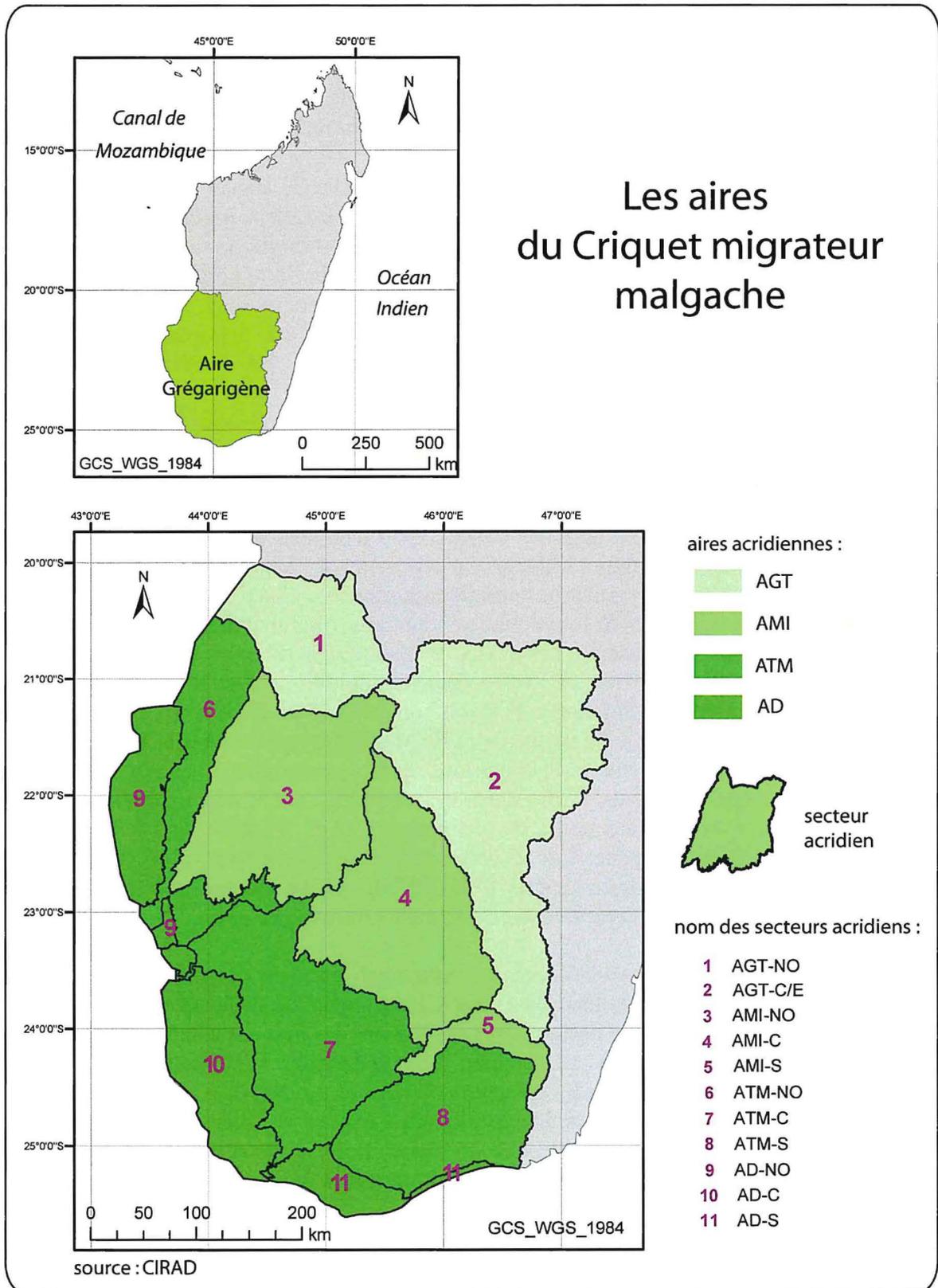


Figure 2 : Carte de l'aire grégarigène du Criquet migrateur malgache

AGT : aire grégarigène transitoire ; AMI : aire de multiplication initiale ; ATM : aire transitoire de multiplication ; AD : aire de densation

Secteurs acridiens : NO = Nord-ouest ; C = Centre ; E = Est ; S = Sud

1.1.3. Contexte climatique sur l'aire grégarigène

Le sud de Madagascar se caractérise essentiellement par un climat tropical sec allant jusqu'au semi-aride dans le sud-ouest. La saison des pluies se déroule de novembre à avril sous l'influence de la descente vers le sud (puis de la remontée vers le nord) du front intertropical (ou zone de convergence intertropicale, ZCIT). L'aire grégarigène peut également être touchée par les cyclones affectant cette région du globe de janvier à mars. La saison sèche se déroule de mai à octobre, les mois d'octobre et de mai marquant des situations de transition. Pendant la saison sèche les alizés en provenance de l'Océan Indien apportent des précipitations sur l'extrême sud-est (Donque 1975).

O	N	D	J	F	M	A	Ma	J	Jt	A	S
trans- -ition	saison des pluies						trans- -ition	saison sèche			

Figure 3 : Saison des pluies et saison sèche dans le sud-ouest de Madagascar

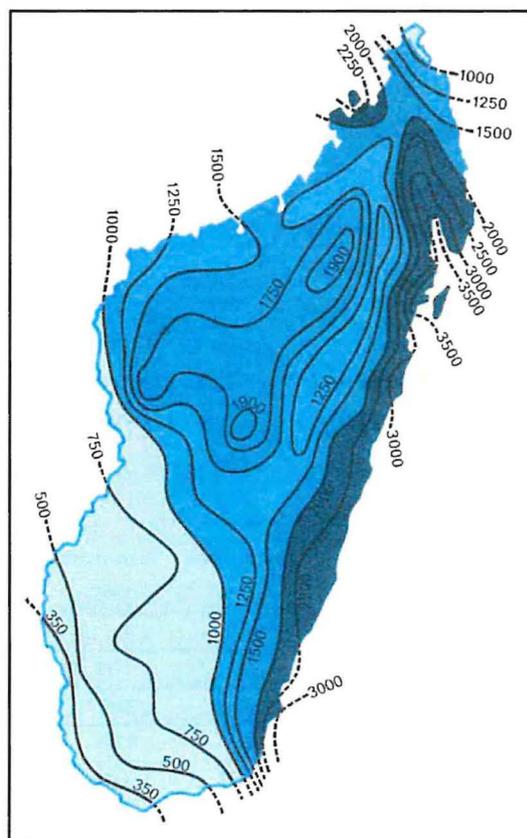


Figure 4 : Isohyètes moyens annuels (Battistini 1971)

1.2. Le SIG Criquet migrateur : principes et données d'entrée

1.2.1. Croisement de trois couches d'information

Pour définir et cartographier des niveaux de risque de pullulations du Criquet migrateur dans l'aire grégarigène le SIG envisagé et préalablement expérimentée sur la zone pilote d'Ejeda (voir **Annexe 2**) croise 3 couches d'information :

- la cartographie des biotopes du Criquet migrateur,
- la pluviométrie,
- l'état des populations acridiennes.

Deux catégories de données entrent en jeu : les données statiques (couche biotope) et les données dynamiques (couches pluviométrie et acridienne). Le croisement de la couche biotope avec la couche pluviométrie permet d'établir, par le biais du potentiel écologique, les surfaces qui sont défavorables, favorables, ou optimales pour le développement de l'espèce. Les données sur les populations de criquet permettent d'établir un potentiel acridien. Ce sont les deux potentiels, écologique et acridien, qui sont ensuite couplés pour déterminer les risques de pullulations.

Le SIG doit produire des cartes de risque et des tableaux planimétriques des surfaces concernés par les différents niveaux de risque (notamment par rapport aux découpages administratifs et opérationnels) afin d'orienter la mobilisation des besoins nécessaires pour répondre aux situations de risque établis (voir **Annexe 2**).

1.2.2. Le pas de temps

L'intégration des données et le diagnostic sont réalisés à l'échelle mensuelle. L'échelle décadaire est ambitionnée, mais dépendante de la fréquence de la collecte et de la transmission des informations de terrain.

1.2.3. Les données d'entrée

1.2.3.1. Données statiques : la cartographie des biotopes

Par définition, le biotope est l'unité territoriale écologiquement homogène où vit une population d'une espèce animale ou végétale particulière (Balança & De Visscher 1992). Les biotopes acridiens sont définis par plusieurs caractéristiques : géomorphologie, formation végétale, nature du relief, réserves et régime hydriques du sol.

La cartographie des biotopes est réalisée pour l'ensemble de l'aire grégarigène à partir d'images optiques à haute résolution (Landsat). Chaque biotope se caractérise par un potentiel écologique plus ou moins révélé chaque mois en fonction de la pluviométrie. La cartographie des biotopes n'est pas finalisée à l'heure de la rédaction de ce mémoire.

1.2.3.2. Données dynamiques : pluviométrie et état des populations acridiennes

Données acridiennes

Les données acridiennes sont acquises lors des prospections sur le terrain (voir **figure 5**). Il existe deux types de prospections acridiennes : les prospections intensives et les prospections extensives.

Les prospections intensives sont réalisées sur des surfaces identifiées, toujours les mêmes : les stations acridiennes. Plusieurs stations sont sous la responsabilité d'un chef de poste acridien (PA) qui doit les prospector au moins 1 fois par décade. Il existe une centaine de stations de ce type

Les postes acridiens sont regroupés au sein de zones acridiennes (ZA) sous la responsabilité de Chefs de zones qui réalisent des prospections extensives dans des secteurs choisis de leur zone sur la base des conditions environnementales, des rapports transmis par les PA ou par les signalisations locales. La localisation de ces prospections extensive varie mais leur nombre est à peu près constant.

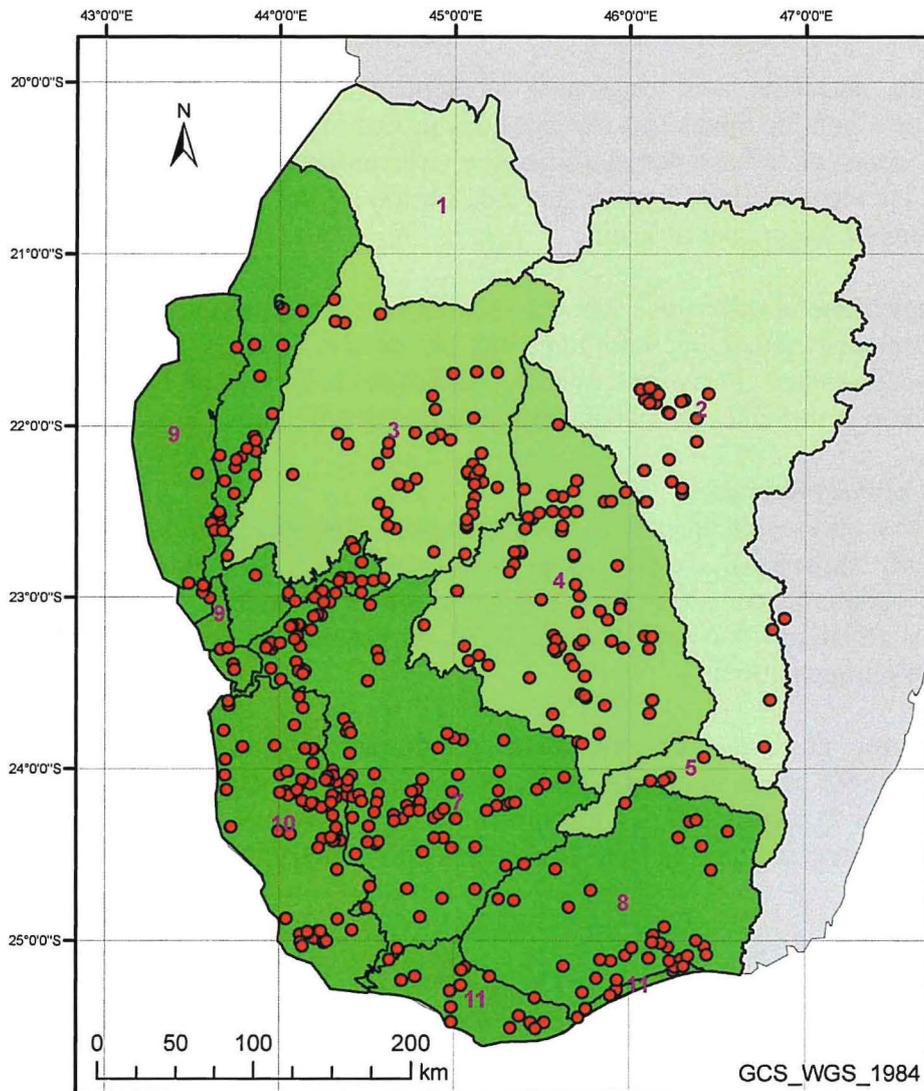
Les prospections acridiennes visent à recueillir les informations sur la structure des populations acridiennes (stade phénologique, état phasaire et densités). Ces informations sont géo- et chrono-référencées. Elles sont ensuite transmises au Service de Surveillance du CNA par un réseau radio et intégrées dans la base de données acridienne.

Données pluviométriques

Les données pluviométriques sont collectées sur des postes pluviométriques dans l'aire grégarigène (**voir figure 6**). Certains sont gérés par le CNA, d'autres relèvent d'autres structures en collaboration avec le CNA pour la transmission de ces informations pluviométriques (Système d'Alerte Précoce SAP, la cotonnière du Sud, HASYMA, et le service météorologique national).

La répartition et la densité des postes pluviométriques est hétérogène. Surtout, la fréquence des relevés et de la transmission des informations varie beaucoup d'un mois à l'autre (**voir figure 7**). Les données sont transmises au Service de Surveillance du CNA par un réseau radio et intégrées dans la base de données pluviométrique.

Stations acridiennes et principaux secteurs de prospection



source : Centre National Anti-acridien de Madagascar (CNA)

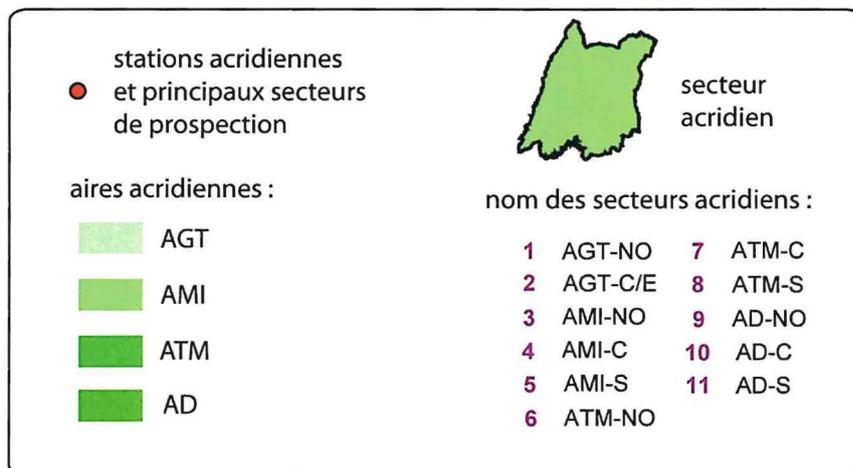
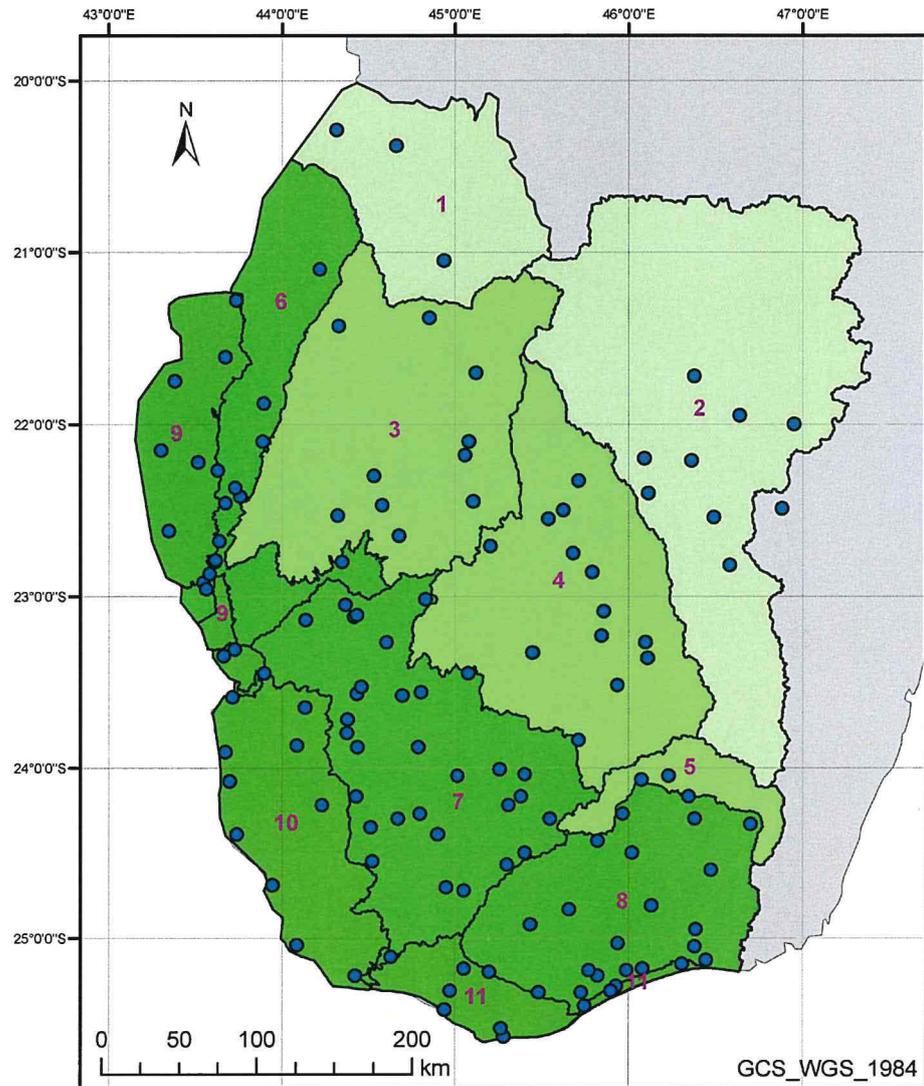


Figure 5 : Carte des stations acridiennes et principaux secteurs de prospection

Les postes pluviométriques susceptibles de transmettre des données



source : Centre National Anti-acridien de Madagascar (CNA)

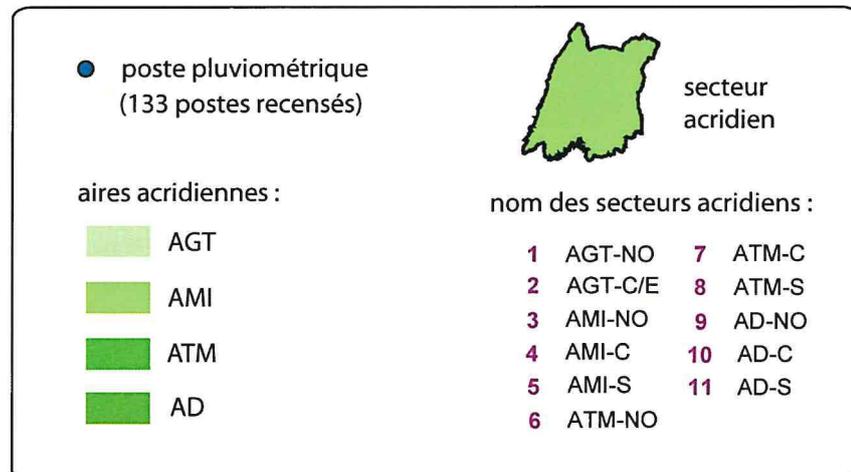


Figure 6 : Carte des postes pluviométriques

Quantités de relevés pluviométriques chaque mois de 2001 à 2007

(source : base de données météorologique du CNA)

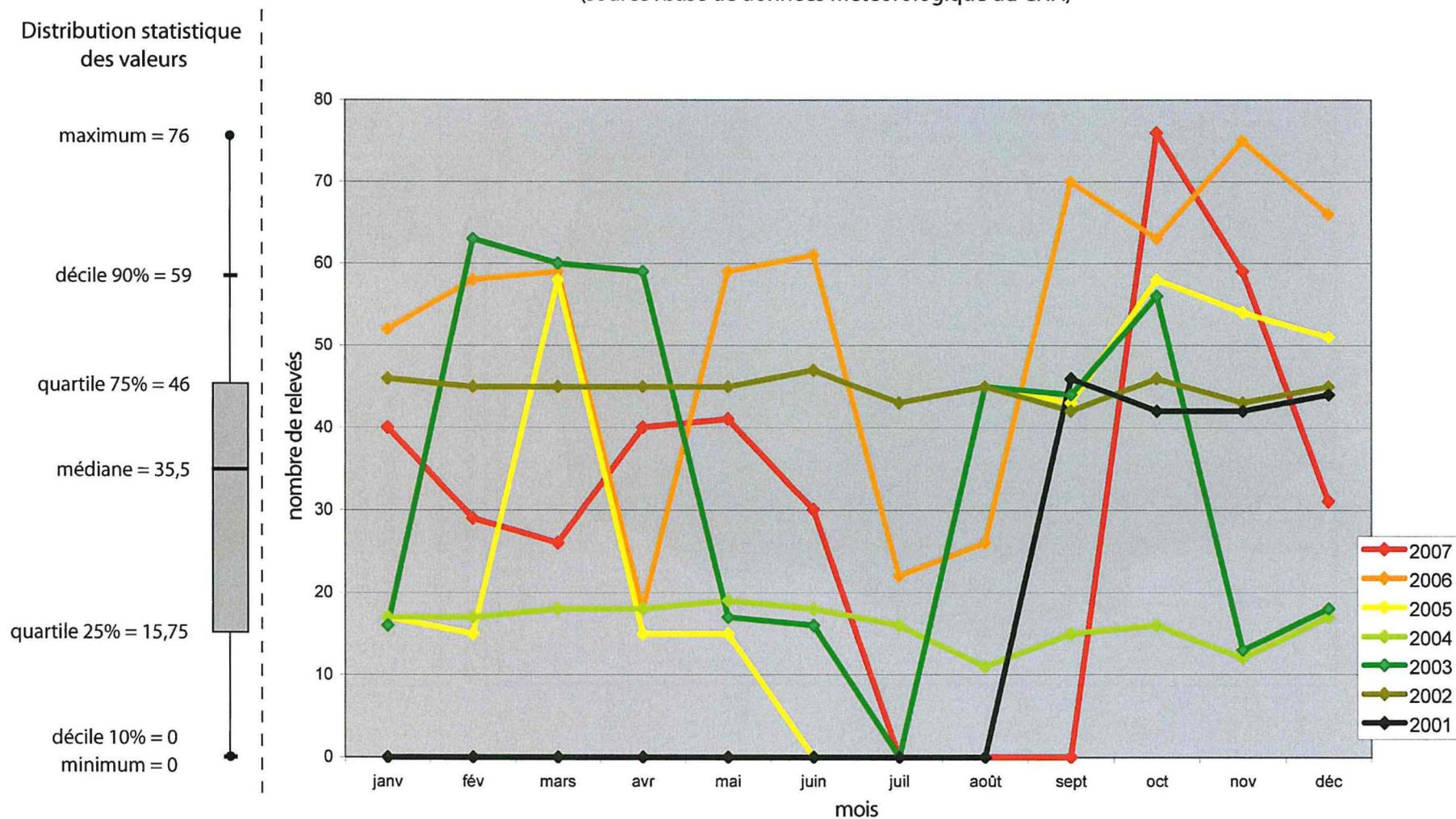


Figure 7 : Quantité d'information pluviométrique collectée chaque mois sur le terrain (source : base de données météorologique du CNA)

1.2.4. Notions de potentiels et diagnostic du risque

1.2.4.1. Le potentiel écologique

Chaque biotope se caractérise par un potentiel écologique traduisant son potentiel pour le développement des populations du Criquet migrateur. A chaque type de biotope est ainsi affecté un potentiel écologique dit maximal. Ce potentiel écologique maximal varie de 0 à 5 et sera plus ou moins révélé en fonction de la pluviosité mensuelle : il s'agit du potentiel écologique réel, il est établi par le croisement de la carte des biotopes et de la carte isohyète d'un mois donné.

1.2.4.2. Le potentiel acridien

Le potentiel acridien résulte du croisement du niveau de grégarité et de la densité en équivalent imago (criquet ailé).

Le niveau de grégarité correspond à la proportion d'individus en phase solitaire, *transiens*, ou grégaire au sein d'une population. La classification comprend 12 classes qui peuvent être regroupées en 6 niveaux³ (voir figure 8) (Andriamaroahina 2005).

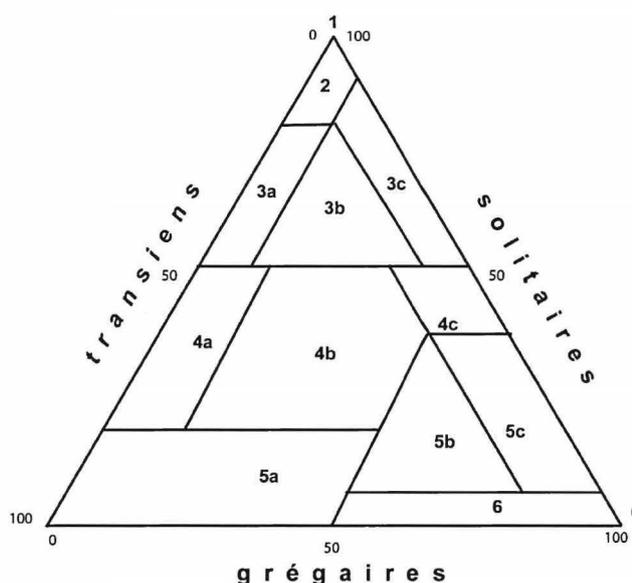


Figure 8 : Niveau de grégarité en fonction de la proportion d'individus solitaires, *transiens* ou grégaires

La densité en équivalent imago permet d'évaluer et comparer les populations acridiennes quel que soit leur stade phénologique (Duranton 2002) : il est considéré que 10 petites larves (de stade L1 à L3) correspondent à 4 grandes larves (de stade L4 et L5) qui correspondent à 1 imago.

Pour une même classe de densité en équivalent imagos, le potentiel acridien est dépendant du niveau de grégarité. Il prend les valeurs de 0 à 5 selon la structure des

³ Le niveau 1 correspond à une population composée uniquement de solitaires, le niveau 2 à une population solitario-transiens ; les niveaux 3, 4 et 5 à des populations transiens plus ou moins avancées dans la grégarisation ; et le niveau 6 à des populations grégaro-transiens où plus de 50 % des individus sont grégaires.

populations (**voir tableau 2**). Pour une forte densité en équivalent imagos (supérieure à 10 000 individus /ha), si le niveau de grégarité est maximal le potentiel acridien est égal à 5, si le niveau de grégarité est égal à 1 le potentiel acridien prend alors la valeur 3 (Andriamaroahina 2005).

Tableau 2 : Potentiel acridien en fonction des densités et du niveau de grégarité des populations

		Densité en équivalent imago (en individus/ha)							
		0	1-10	10-100	100-500	500-1500	1500-2500	2500-10000	>10000
niveau de grégarité	1	0	1	1	2	3	3	3	3
	2	0	1	2	2	3	3	3	3
	3	0	2	2	2	3	3	3	4
	4	0	2	2	2	3	3	4	4
	5	0	2	2	3	3	3	4	5
	6	0	2	2	3	3	3	4	5

1.2.4.3. L'évaluation du risque

Dans le SIG Criquet migrateur, le croisement des deux potentiels, acridien et écologique, permet d'attribuer un niveau de risque acridien pour chaque biotope. Ce niveau de risque varie de 0 à 6 (**voir tableau 3**). Les niveaux 1 et 2 sont à interpréter comme une diminution du risque tandis que les niveaux 4, 5 et 6 traduisent un accroissement.

Tableau 3 : détermination des niveaux de risque acridien en fonction des potentiels acridien et écologique

		Potentiel acridien					
		0	1	2	3	4	5
Potentiel écologique	0	0	0	0	1	2	3
	1	0	0	1	2	3	3
	2	0	1	1	2	3	3
	3	0	1	2	3	4	5
	4	0	2	3	4	4	5
	5	0	2	4	4	5	6

La Carte de risque et les tableaux planimétriques (**voir annexe 2**) permettent de localiser les zones à risque et d'évaluer les surfaces concernées, ce qui permet la programmation des options de lutte, voire de lancer une alerte précoce en cas de recrudescence.

1.3. L'interpolation de données ponctuelles et l'évaluation de l'incertitude associée

Les données acridiennes et pluviométriques sont toutes deux des informations ponctuelles qu'il faut interpoler pour obtenir une couche surfacique des potentiels écologique et acridien.

1.3.1. L'interpolation de données ponctuelles

L'interpolation spatiale est un traitement mathématique utilisé pour l'étude d'un phénomène qui se déploie continûment sur le territoire (par exemple la pluviométrie) mais pour lequel on ne peut, en pratique, disposer d'une mesure en tout point du territoire considéré. De tels phénomènes ne sont appréhendés que par certaines mesures localisées (les postes pluviométriques) et l'interpolation vise à transformer cette information ponctuelle, circonscrite aux points de mesure, en une information surfacique pour l'ensemble du territoire.

L'espace concerné par une telle étude est généralement appelé « champ » (C). L'ensemble des mesures relevées sur le terrain est considéré comme une fonction numérique définie sur le champ C et est appelé **variable régionalisée**. La valeur prise par cette fonction en un point particulier (Px) de l'espace est appelée **valeur régionalisée**. L'interpolation se définit alors par - l'estimation de la valeur d'une variable régionalisée en un site où celle-ci n'a pas été mesurée, à partir des valeurs régionalisées observées - (Cressie 1993). Le traitement mathématique qui réalise cette estimation à partir des points de mesure est appelé **fonction de pondération**.

Les mesures observées sur le terrain représentent le matériel de base en interpolation spatiale. Il existe cependant différentes méthodes d'interpolation, en relation avec les formes de l'exploitation de ce matériel de base et la nature de la fonction de pondération. Les diverses méthodes d'interpolation produisent des surfaces qui peuvent être très différentes. Et il s'agit de bien considérer qu'une certaine incertitude est associée à toute interpolation.

1.3.2. Distinction méthodes déterministes et méthodes géostatistiques

1.3.2.1. Méthodes déterministes

Les méthodes d'interpolation s'appuyant uniquement sur les valeurs de la variable régionalisée observées aux points de mesure sont dites **déterministes**. Elles affectent une valeur en tout point P du champ C en lien direct avec les valeurs observées aux points de mesure voisins de P.

Les méthodes d'interpolation déterministes sont généralement subdivisées en trois catégories :

1- Les méthodes barycentriques, qui sont également appelées moyennes mobiles : les valeurs pour chaque point P reposent sur une moyenne pondérée des valeurs observées aux points de mesure voisins de P.

exemple : méthode de l'inverse de la distance (*Inverse Distance Weighting*).

2- Les techniques par partitionnement de l'espace qui divisent le champ en secteurs au sein desquels tous les points P auront la même valeur, déterminée à partir de la valeur des points de mesure les plus proches.

exemple : méthode dite par voisinage naturel (*Natural Neighbor*).

- 3- La famille des splines qui déterminent pour leur part la valeur de la variable régionalisée en tout point P du champ C de façon à minimiser les aspérités dans la variabilité spatiale des valeurs relevées aux points de mesure et ainsi mettre en valeur les grandes tendances de la répartition spatiale du phénomène considéré.

exemple : *Radial Basis Function, Local Polynomial Interpolation, et Global Polynomial Interpolation.*

La méthode actuellement utilisée par le Centre National Anti-acridien malgache (CNA) pour l'interpolation des données pluviométriques et acridiennes est une méthode déterministe : il s'agit de la méthode de l'inverse de la distance (*Inverse Distance Weighting, IDW*).

1.3.2.2. Méthodes géostatistiques

Il existe également des méthodes d'interpolation spatiale dites **stochastiques** ou **géostatistiques**. Elles regroupent les techniques dérivées du **krigeage** (*kriging*). Elles diffèrent des méthodes déterministes dans leur façon d'exploiter le matériel de base (les mesures observées sur le terrain). En effet, dans les méthodes géostatistiques la valeur de la variable régionalisée en un point P non échantillonné ne découle plus de façon linéaire des valeurs relevées sur les sites d'observations voisins de P (cas des méthodes déterministes). Les valeurs relevées sur le terrain sont d'abord utilisées pour déterminer ce qui est appelé « la structure de dépendance spatiale des données », c'est-à-dire la relation entre la distance et la différence de valeur entre les points de mesure. Un modèle mathématique de cette structure de dépendance spatiale des données est défini et c'est ce modèle mathématique qui sera ensuite exploité comme fonction de pondération pour calculer, à partir des valeurs relevées sur les points de mesure, la valeur prise par la variable régionalisée au point P considéré. C'est pour cette raison qu'il est dit que les méthodes géostatistiques proposent un second niveau d'abstraction pour la modélisation de la réalité physique étudié (Baillargeon 2005).

De nombreux travaux témoignent des performances des méthodes géostatistiques par rapport aux méthodes déterministes pour générer les prévisions spatiales les plus justes (Baillargeon *et al.* 2004, Baillargeon 2005, Cardenas 2004, Courault 2002, Gratton 2002, Nikolova & Vassilev 2008, Renard & Comby 2006). Sur le plan théorique, Baillargeon (2005) affirme que « par rapport aux méthodes déterministes les postulats de base du krigage modélisent mieux la réalité pour des données à référence spatiale et que le krigage ressort gagnant de la comparaison théorique avec les autres méthodes d'interpolation ».

De plus, les méthodes géostatistiques permettent d'estimer les erreurs potentielles associées à l'interpolation sur l'ensemble de la surface interpolée. Elles sont les seules à proposer une telle approche de l'incertitude et cet aspect représente un critère de performance conséquent dans la comparaison entre méthodes déterministes et géostatistiques. Nous allons donc nous pencher sur les principes sur lesquels s'appuient les interpolations par krigage et l'estimation de l'incertitude associée.

1.3.3. Principes généraux des méthodes géostatistiques

1.3.3.1. Différentes variantes du krigeage

Il existe plusieurs sortes de krigeage. Elles sont classifiées en deux grands groupes⁴ :

1. les méthodes dites linéaires qui diffèrent entre elles par la façon dont la moyenne de la variable à interpoler est prise en compte :
 - krigeage ordinaire (*Ordinary Kriging*),
 - krigeage simple (*Simple Kriging*),
 - krigeage universel (*Universal Kriging*),
2. les méthodes dites non linéaires :
 - krigeage disjonctif (*Disjunctive Kriging*),
 - krigeage de probabilité (*Probability Kriging*)
 - krigeage d'indicatrice (*Indicator Kriging*)

Les krigeage d'indicatrice et de probabilité ne permettent pas d'interpoler directement les valeurs de la variable mais uniquement des indicateurs de probabilité pour le dépassement ou le non-dépassement d'une valeur seuil.

Il existe également un cokrigeage (*Cokriging*) qui permet d'intégrer une ou plusieurs variables secondaires (par exemple le relief) pour compléter la modélisation de la structure de dépendance spatiale des données de la première variable (par exemple la pluviométrie) et procéder à l'interpolation. Le cokrigeage peut être ordinaire, simple, universel, disjonctif, de probabilité, ou d'indicatrice, suivant la variante exploitée.

Toutes ces variantes reposent sur les mêmes principes de base : le semivariogramme expérimental et le modèle variographique.

1.3.3.2. Semivariogramme expérimental et modèle variographique

La structure de dépendance spatiale des données est évaluée au sein du semivariogramme expérimental (**voir figure 9**). Le semivariogramme place sur un graphique en nuage de points la différence de valeurs entre deux points de mesure en fonction de la distance entre ceux-ci. Chaque point sur le semivariogramme représente la comparaison de deux points de mesure avec en ordonnée la différence de valeurs entre ces deux et en abscisse la distance les séparant (**voir figure 10**). L'on obtient de cette manière une représentation de la variabilité des valeurs en fonction de la distance.

⁴ Les méthodes linéaires et non linéaires diffèrent par le traitement mathématique réservé aux données d'entrée qui au sein des méthodes non linéaires sont préalablement transformées.

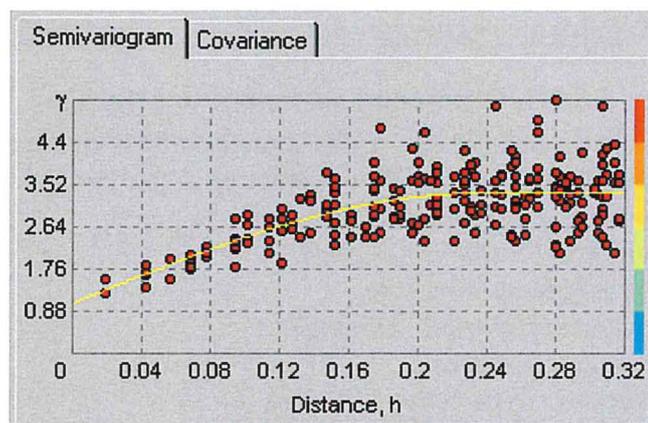


Figure 9 : Semivariogramme expérimental tel qu'il apparaît au sein du logiciel ArcGIS et de son Module Geostatistical Wizard.
Abscisse : Distance entre les points. Ordonnée : Différence de valeurs entre les points

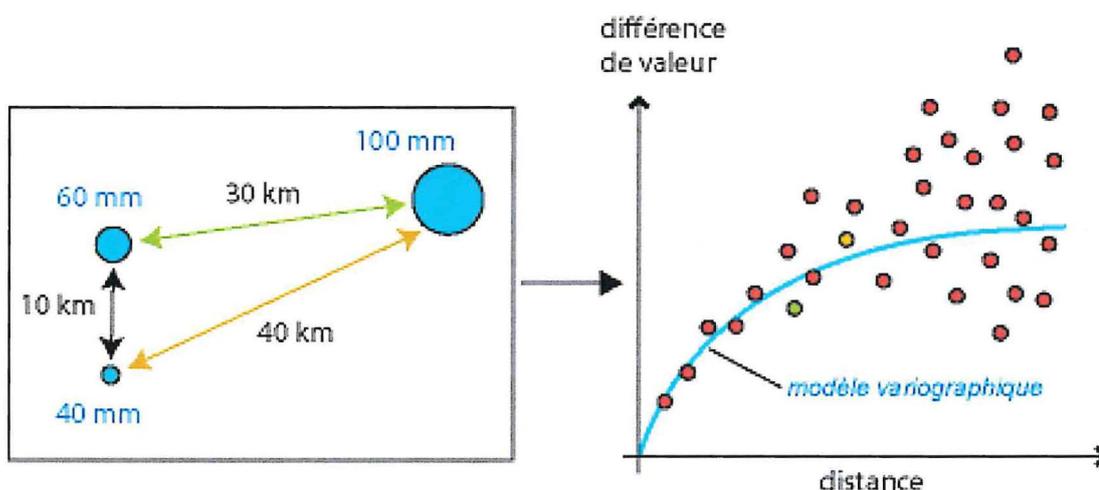


Figure 10 : Construction du semivariogramme : distance et différence de valeurs au sein de chaque couple de points

A partir du semivariogramme, un modèle théorique de la structure de dépendance spatiale est déterminé : il est appelé modèle variographique. Il est matérialisé sur la **figure 9** par la ligne jaune traversant le nuage de points (et sur la **figure 10** par la ligne bleu).

Le modèle variographique est une fonction, au sens mathématique, qui fixe les modalités de la variabilité dans l'espace des valeurs interpolées. C'est cette fonction qui est utilisée lors de l'interpolation comme fonction de pondération ; c'est-à-dire qu'elle détermine les poids à assigner aux valeurs de chaque point de mesure pour le calcul de la pluviométrie en un point non échantillonné.

La forme du modèle variographique est calculée de façon à minimiser la variance entre la valeur en ordonnée des points du semivariogramme expérimental (la structure de dépendance spatiale réelle) et celle du modèle variographique (le modèle théorique) à l'échelle de l'ensemble du jeu de données. Il existe cependant plusieurs modèles

variographiques en relation avec la nature de la fonction mathématique utilisée (par exemple gaussienne, exponentielle,...).

1.3.3.3. Pépité (*nugget*), palier (*sill*), et portée (*range*)

L'effet de pépité (*nugget*)

Sur le graphique du semi-variogramme, pour une distance égale à 0, le modèle variographique ne coupe pas forcément l'axe des ordonnées à la valeur 0 (voir figure 11). Dans cette configuration, le modèle de la structure de dépendance spatiale des données témoigne alors d'une dissemblance dans les valeurs pour des points pourtant très voisins. Cette dissemblance peut être due à des erreurs dans les données (prise des échantillons, saisie,...) mais d'autres facteurs peuvent également intervenir. Des pluies erratiques peuvent ainsi induire de tels effets de pépité.

Palier (*sill*) et portée (*range*)

Le modèle variographique peut atteindre un plateau. La présence d'un plateau indique qu'à partir d'une certaine distance il n'y a plus de dépendance spatiale entre les données. Cette distance est appelée portée, et la valeur en ordonnée pour la distance de la portée sur le semivariogramme est appelée palier (voir figure 11). Lors de l'interpolation, lorsque la distance entre le point à interpolier et les points de mesure voisins est supérieure à la portée, le krigeage calcule simplement une valeur moyenne.

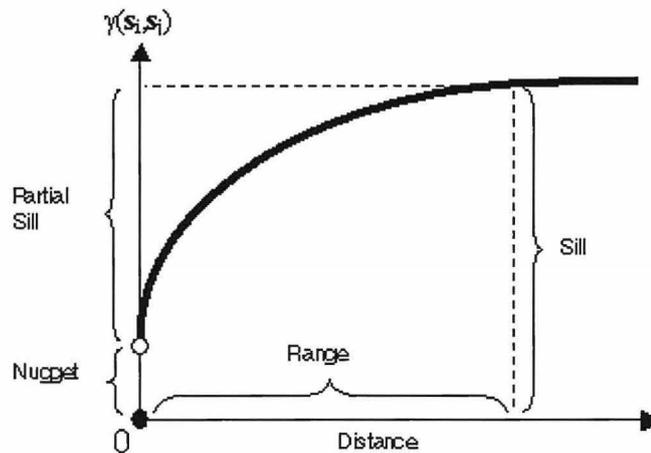


Figure 11 : Pépité (*nugget*), palier (*sill*), et portée (*range*) sur le modèle variographique

Dérive (*trend*) et anisotropie (*anisotropy*)

Il est possible de prendre en compte deux caractéristiques importantes de la répartition spatiale de la variable régionalisée : à savoir la présence d'une « dérive » (*trend*) ou d'une anisotropie (*anisotropy*).

Une dérive caractérise l'influence d'un facteur extérieur sur la variable régionalisée. Elle affecte tout le jeu de données. Elle est considérée comme la tendance générale de la

variable. Lors de l'interpolation, la dérive (si stipulée) est supprimée des données au début du processus puis remplacée en fin de processus.

L'anisotropie qualifie une dépendance d'un phénomène à la direction. En interpolation géostatistique, l'anisotropie montre une auto-corrélation plus élevée dans une direction que dans une autre et caractérise donc une répartition spatiale orientée selon un axe privilégié. Lors de l'interpolation, le traitement est différent de celui de la dérive. L'anisotropie adapte les paramètres de voisinage (pondération et sélection des points voisins) et la forme du modèle variographique suivant l'orientation de l'axe privilégié de répartition des valeurs. Ce ne sont ainsi pas les données d'entrée qui sont modifiées mais seulement la fonction de pondération qui est adaptée selon la direction.

1.3.4. Evaluation et spatialisation de l'incertitude dans les méthodes géostatistiques

1.3.4.1. Principe

Contrairement aux méthodes déterministes, les méthodes géostatistiques permettent de réaliser une estimation de l'incertitude associée à l'interpolation, et de produire ainsi des cartes d'incertitude. Une carte d'incertitude, ou *Prediction Standard Error Maps* (PSEM) représente les erreurs potentielles de prédiction, c'est-à-dire la dispersion possible de la valeur réelle autour de la valeur prédite par l'interpolation (**voir figure 13**).

C'est en se basant sur la variance entre le semivariogramme (la structure de dépendance spatiale réelle des données) et le modèle variographique (le modèle théorique de cette variabilité dans l'espace) utilisé comme fonction de pondération que les méthodes géostatistiques permettent d'estimer la valeur des erreurs potentielles (**voir figure 12**). Elles sont calculées en unité de la variable interpolée (donc en millimètres de pluie pour des données pluviométriques exprimées en millimètres). Ces erreurs potentielles sont appelées *Standard Error* et reposent sur le principe de l'écart-type (moyenne quadratique des écarts à la moyenne⁵). Il s'agit de la marge d'erreur associée aux valeurs interpolées. La valeur réelle de la variable interpolée peut être située dans l'intervalle formé par la valeur interpolée + ou - la valeur de l'erreur potentielle.

⁵ Soit la racine carrée de la variance. L'écart-type est également appelé écart quadratique moyen, et caractérise la dispersion d'une variable autour de sa moyenne.

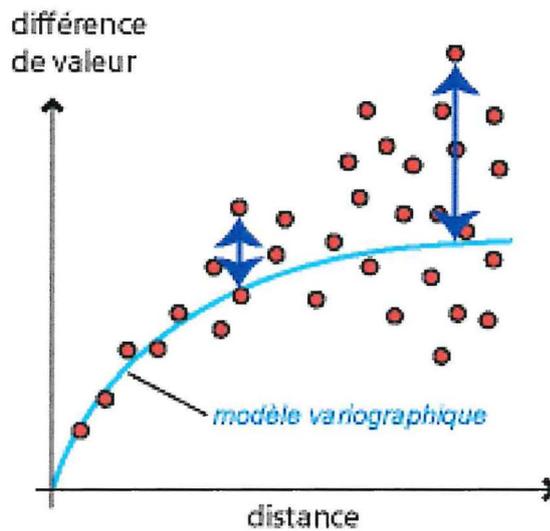


Figure 12 : Principe de l'estimation de l'incertitude basée sur la variance entre le semivariogramme et le modèle variographique

Le semivariogramme représente la structure de dépendance spatiale réelle des données. Le modèle variographique représente le modèle théorique de cette structure de dépendance spatiale.

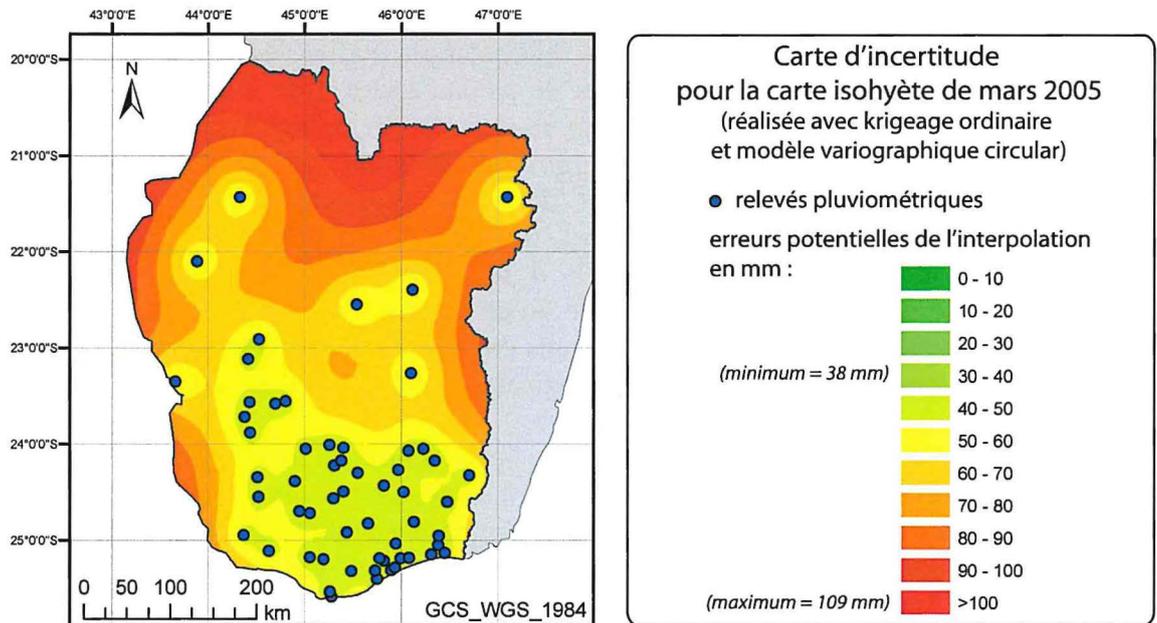


Figure 13 : Exemple de carte d'incertitude pour une interpolation de valeurs pluviométriques (mars 2005)

Les cartes d'incertitude permettent non seulement de quantifier et localiser la confiance dans les résultats d'une interpolation⁶, mais de mettre également en évidence les zones où le

⁶ On peut remarquer que la **figure 13** témoigne de très fortes incertitudes sur les valeurs interpolées de pluviométrie.

maillage du territoire par le réseau de collecte de l'information sur le terrain (par exemple le réseau de pluviomètres) mérite d'être renforcé. Il existe cependant des contraintes dans l'exploitation de l'estimation de l'incertitude.

1.3.4.2. Contraintes pour l'exploitation des cartes d'incertitude

Les PSEM ne représentent pas les erreurs réelles de l'interpolation mais seulement l'incertitude estimée. La validité de cette estimation dépend de l'adéquation du modèle variographique avec la variabilité spatiale de la variable interpolée.

Les PSEM produites selon différents paramétrages diffèrent ainsi les unes des autres sur le plan des valeurs et sur le plan de la répartition spatiale de l'incertitude. Ces différences dans l'estimation de l'incertitude ne permettent pas de comparer la précision et les performances des différentes méthodes d'interpolation. Une PSEM laissant apparaître des erreurs potentielles plus faibles que les autres PSEM ne reflète pas nécessairement une méthode d'interpolation plus performante.

La validité de l'estimation de l'incertitude doit donc être vérifiée. Nous reviendrons par la suite sur les outils disponibles pour réaliser ceci.

1.4. Logiciel utilisé

Le SIG d'avertissement acridien est construit via le logiciel ArcGIS de la société ESRI. Il est destiné à être exploité avec la version 9.2 de ce logiciel. Le niveau de licence utilisée est une licence ArcView accompagnée de l'extension Geostatistical Analyst. Cette extension propose une grande diversité de méthodes d'interpolation (parmi lesquelles les différents types de krigeage présentés précédemment) et de paramétrages. Elle fournit notamment 11 familles de fonction différentes pour fixer le modèle variographique (*circular, spherical, tetraspherical, pentaspherical, exponential, gaussian, rational quadratic, hole effect, K-Bessel, J-Bessel, stable*). Elle fournit aussi des outils performants pour identifier les paramétrages optimaux et permet également d'évaluer la fiabilité de l'estimation de l'incertitude représentée au sein des cartes d'incertitude produites par les méthodes géostatistiques. Elle n'est cependant disponible qu'en anglais, et c'est pour cette raison que dans ce document sont indiqués les termes anglais en italique à côté des termes français. Un tutoriel pour l'utilisation de l'extension Geostatistical Analyst est proposé en **annexe 3**.

L'extension Spatial Analyst fournit elle aussi la possibilité de réaliser des interpolations. Les paramétrages et les méthodes offertes y sont cependant moins nombreux que dans l'extension Geostatistical Analyst. Les outils offerts par Geostatistical Analyst pour identifier les paramétrages optimaux sont également absents. De plus les surfaces produites par interpolation sous Spatial Analyst ne peuvent être étendues hors des limites fixées par les coordonnées des points les plus périphériques (extrême Nord, extrême Sud, extrême Est, extrême Ouest). Or, compte tenu de la répartition des postes pluviométriques dans l'aire grégarigène il est essentiel au sein du SIG Criquet migrateur de pouvoir procéder à cette extension de l'interpolation hors des limites fixées par les points les plus périphériques, c'est-à-dire de procéder à une extrapolation.

2. Objectifs et méthodologie

2.1. Objectifs des travaux

La problématique générale du SIG vise, dans le propos d'une alerte précoce, à établir un diagnostic de risque concernant les pullulations du Criquet migrateur malgache. En relation au caractère d'outil d'aide à la décision du SIG, une réflexion a été engagée concernant l'incertitude associée au diagnostic. C'est au sein de cette problématique visant à replacer le diagnostic établi dans un contexte de fiabilité et à lui associer des considérations de confiance dans les résultats que s'intègrent les travaux réalisés durant ce stage.

Les travaux développés dans le présent mémoire concernent les couches acquises par interpolation de données ponctuelles. Leurs objectifs s'articulent autour de 3 axes :

- **l'exploitation des méthodes géostatistiques et la sélection d'une méthode d'interpolation préférentielle**

Les méthodes géostatistiques ont la capacité d'estimer l'incertitude associée à leurs interpolations et apparaissent ainsi pouvoir avantageusement remplacer la méthode de l'inverse de la distance utilisée jusqu'ici. Mais il s'agit tout de même de vérifier que la précision de leurs interpolations peut être au moins équivalente à la précision produite par la méthode de l'inverse de la distance.

D'autre part, compte tenu de la diversité des types de krigeage et des paramétrages et compte tenu du fait que les manipulations à réaliser pour déterminer et fixer les paramètres optimaux sont complexes, l'exploitation des méthodes géostatistiques peut s'avérer malaisée. Aussi, afin de faciliter l'exploitation opérationnelle de ces méthodes par des utilisateurs peu expérimentés, une part des travaux vise à déterminer s'il est possible de dégager un type de krigeage et un modèle variographique préférentiels, capables de garantir des performances satisfaisantes sur le plan de la précision et de la fiabilité de l'estimation de l'incertitude, et dont l'usage pourrait ainsi être systématisé.

- **garantir la qualité des couches d'information pluviométrique et acridienne**

Il s'agit ici de déterminer quelle quantité d'information en provenance du terrain est nécessaire pour garantir la qualité des couches d'informations acridiennes et pluviométriques.

- **l'intégration d'une évaluation de la qualité des couches d'informations pluviométrique et acridienne au sein du SIG**

Il s'agit ici de construire un outil capable de produire une évaluation de la qualité des couches acridiennes et pluviométriques utilisées pour construire le diagnostic de risque et d'associer à celui-ci une mesure de l'incertitude des résultats.

2.2. Méthodologie pour la sélection d'une méthode d'interpolation préférentielle

2.2.1. Les critères de performance considérés

Les critères de performance considérés concernent :

- la précision de l'interpolation,
- et la fiabilité de l'estimation de l'incertitude

La précision de l'interpolation doit être la meilleure possible, et surtout au moins équivalente à la méthode de l'inverse de la distance. La fiabilité de l'estimation de l'incertitude doit être la meilleure possible.

2.2.2. Les méthodes testées :

2.2.2.1. Pour l'évaluation de la précision des méthodes géostatistiques en comparaison de la méthode de l'inverse de la distance

Pour évaluer les performances des méthodes géostatistiques sur le plan de la précision des interpolations en comparaison de celles de la méthode de l'inverse de la distance, l'ensemble des variantes de krigeage⁷ disponibles avec l'extension Geostatistical Analyst et l'ensemble des principaux paramétrages (modèles variographiques, options de dérive et d'anisotropie) ont été testés.

Au total, ce sont les résultats produits par le krigeage ordinaire, le krigeage simple, le krigeage universel, et le krigeage disjonctif, couplés chacun avec les 11 modèles variographiques disponibles, ainsi qu'avec les options de dérive et d'anisotropie⁸, qui ont été comparés avec ceux de la méthode de l'inverse de la distance.

Ceci a été réalisé pour des données pluviométriques et pour des données acridiennes.

2.2.2.2. Pour la sélection d'une méthode géostatistique préférentielle

L'objectif étant de dégager une méthode géostatistique et des paramétrages interopérables à tous les jeux de données, les paramétrages par trop spécifiques au jeu de données considérés ont été éliminés. De cette façon, ni l'anisotropie ni la dérive n'ont été pris en compte. Dans la même logique puisque le krigeage universel implique obligatoirement la prise en compte d'une dérive (dont le rayon d'action optimal à affecter dépend du jeu de données), ce type de krigeage a également été mis de côté. De même, le krigeage disjonctif réclame une transformation préalable des données et le mode de transformation utilisé doit être choisis parmi différentes options. Le krigeage disjonctif a donc également été écarté.

Les méthodes testées concernent donc :

- **pour les données pluviométriques :**
 - le krigeage ordinaire,
 - le krigeage simple,
- **pour les données acridiennes :**
 - le krigeage ordinaire,
 - le krigeage simple,
 - le cokrigeage

⁷ hors krigeage d'indicatrice et krigeage de probabilité

⁸ c'est-à-dire : sans anisotropie ni dérive, avec anisotropie seule, avec dérive 100% global, avec dérive 50% global 50% local, avec dérive 100% local, avec anisotropie et dérive 100% global, avec anisotropie et dérive 50% global 50% local, avec anisotropie et dérive 100% local.

En effet, la répartition des populations de Criquet migrateur se trouve très largement influencée par la répartition des pluies. Aussi est-il apparu utile d'évaluer les performances du cokrigeage pour les données acridiennes, en prenant en compte comme variable secondaire la carte isohyète du mois considéré. Le cokrigeage peut être ordinaire, simple, universel ou disjonctif en fonction du type de krigeage exploité. C'est le type de krigeage à une seule variable ayant obtenu les meilleurs résultats pour l'interpolation des données acridiennes qui sera exploité pour évaluer les performances du cokrigeage.

Pour les données pluviométriques comme pour les données acridiennes les paramétrages testés concernent exclusivement les 11 modèles variographiques disponibles au sein de l'extension Geostatistical Analyst.

2.2.3. Comment évaluer les performances des méthodes ? Le test de validation croisée

2.2.3.1. Principe

Le test de la validation croisée⁹ (*cross-validation*) consiste à retirer successivement du jeu de données chaque point de mesure pour procéder à l'interpolation sans celui-ci et évaluer, à son emplacement, la différence entre valeur prédite par l'interpolation et valeur effectivement relevée sur le terrain.

C'est-à-dire que tous les points de mesure deviennent l'un après l'autre des points de contrôle pour évaluer la performance de l'interpolation.

2.2.3.2. Résultats obtenus

La validation croisée mesure ainsi l'erreur (*Error*) associée à l'interpolation en soustrayant la valeur relevée à la valeur prédite¹⁰. Nous l'appellerons - Erreur observée - pour bien la distinguer des - Erreurs potentielles (*Standard Error*) - estimées par les méthodes géostatistiques. La valeur de l'erreur observée (*Error*) sera positive ou négative suivant la sur- ou la sous-estimation de la prédiction par rapport à la pluviométrie effectivement mesurée sur le terrain.

L'erreur observée permet de calculer un second indicateur : l'erreur réduite (*Standardized Error*), qui correspond au rapport de l'erreur potentielle sur l'erreur observée¹¹.

Les résultats obtenus au test de validation croisée sont présentés sous deux formes :

- des indicateurs moyens pour l'ensemble du jeu de données
- le récapitulatif des résultats obtenus à l'emplacement de chaque point de mesure

⁹ La cross-validation a été préférée à la validation. Les résultats proposés et la finalité pour les deux procédures sont les mêmes : mesurer la capacité de la méthode d'interpolation à s'approcher de la réalité du phénomène considéré en comparant, à l'emplacement des points de contrôle, valeurs interpolées et valeurs relevées sur le terrain. Par contre le processus de la validation divise le jeu de données en deux lots, l'un utilisé pour effectuer l'interpolation, l'autre pour vérifier les résultats et mesurer les erreurs. Or cette division en deux jeux de données n'est possible que si les données de départ sont suffisamment nombreuses, ce qui n'est pas le cas pour les données pluviométriques dans le sud-ouest de Madagascar.

¹⁰ $Error = Predicted - Measured$

¹¹ $Standardized Error = Standard Error / Error$

Les indicateurs moyens pour l'ensemble du jeu de données (voir figure 14)

Ils permettent de dégager les méthodes qui envisagent le mieux la répartition spatiale de la variable interpolée à l'échelle de l'ensemble du jeu de données.

L'on obtient ainsi :

- la valeur moyenne des erreurs observées (*Mean Prediction Errors*),
- l'écart-type des erreurs observées (*Root-Mean-Square Prediction Errors*)

Ces résultats sont en unités de la variable interpolée (en millimètres pour des données pluviométriques). Plus la moyenne est proche de 0 et plus l'écart-type est faible, plus l'interpolation envisage bien la pluviométrie par rapport à la réalité mesurée sur le terrain. Ces deux indicateurs évaluent la précision moyenne de l'interpolation.

A ceci s'ajoutent (pour les méthodes géostatistiques) :

- la moyenne des erreurs potentielles estimées à l'emplacement des points de mesure testés (*Average Standard Error*),
- la moyenne des erreurs réduites (*Mean Standardized Prediction Errors*),
- le rapport des erreurs observées sur les erreurs potentielles estimées (*Root-Mean-Square Standardized Prediction Errors*) (écart-type des erreurs observées / valeur moyenne des erreurs potentielles),

Ces trois indicateurs permettent d'évaluer la qualité de l'estimation de l'incertitude, en comparant erreurs potentielles estimées et erreurs observées. Si les erreurs potentielles estimées lors du krigeage correspondent à l'erreur observée alors :

- la valeur moyenne des erreurs potentielles (*Average Standard Errors*) doit être égale à l'écart-type des erreurs observées (*Root-Mean-Square Prediction Errors*) ;
- et le rapport des deux (*Root-Mean-Square Standardized Prediction Errors*) doit donc être égal à 1.

Donc, plus le rapport des erreurs observées sur les erreurs potentielles (*Root-Mean-Square Standardized Prediction Errors*) est proche de 1, mieux la méthode évalue l'incertitude associée à ses prédictions. Un résultat supérieur à 1 signifie que les erreurs potentielles sont sous-estimées par rapport aux erreurs observées et un résultat inférieur à 1 signifie au contraire que les erreurs potentielles sont surestimées. Cet indicateur permet notamment d'évaluer la qualité des cartes d'incertitude produites.

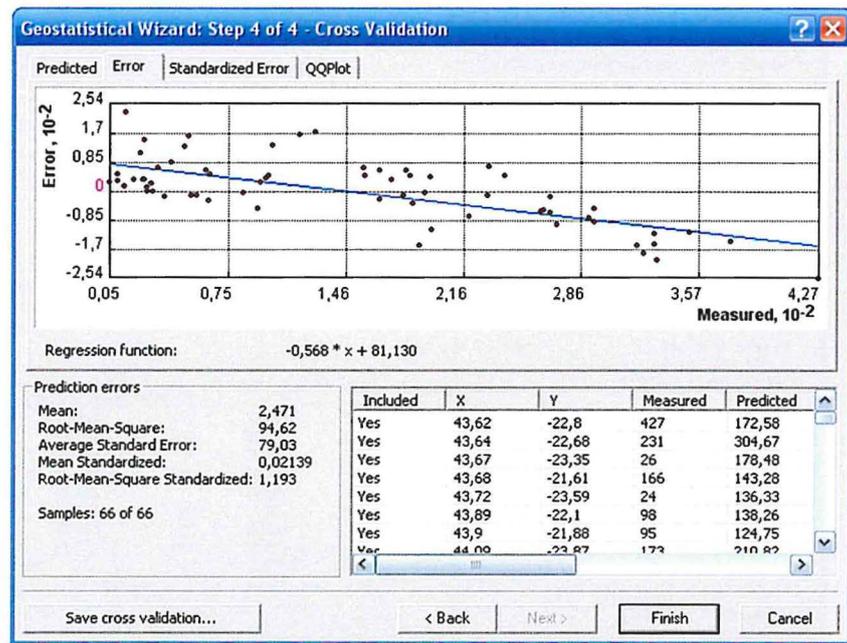


Figure 14 : Affichage des résultats obtenus au test de validation croisée dans le module Geostatistical Wizard

Les résultats moyens sont présentés dans l'encadré en bas à gauche de la fenêtre intitulé « Prediction errors »

Le récapitulatif des résultats obtenus à l'emplacement de chaque point de mesure (voir figures 15 et 16)

Le récapitulatif des résultats obtenus à l'emplacement de chaque point de mesure est présenté sous forme de table et exportable au format Database (.dbf). Cette table récapitule pour chaque point de mesure (outre ses coordonnées) :

- la valeur mesurée, notée *Measured*
- la valeur prédite, notée *Predicted*
- l'erreur potentielle estimée (*Standard Error*), notée *Std Error*
- l'erreur observée (*Error*) lors de la validation croisée, notée *Error*
- l'erreur réduite (*Standardized Error*), notée *Stdd Error*
- la valeur de l'erreur réduite dans le cas d'une distribution normale des données, notée *NormValue*

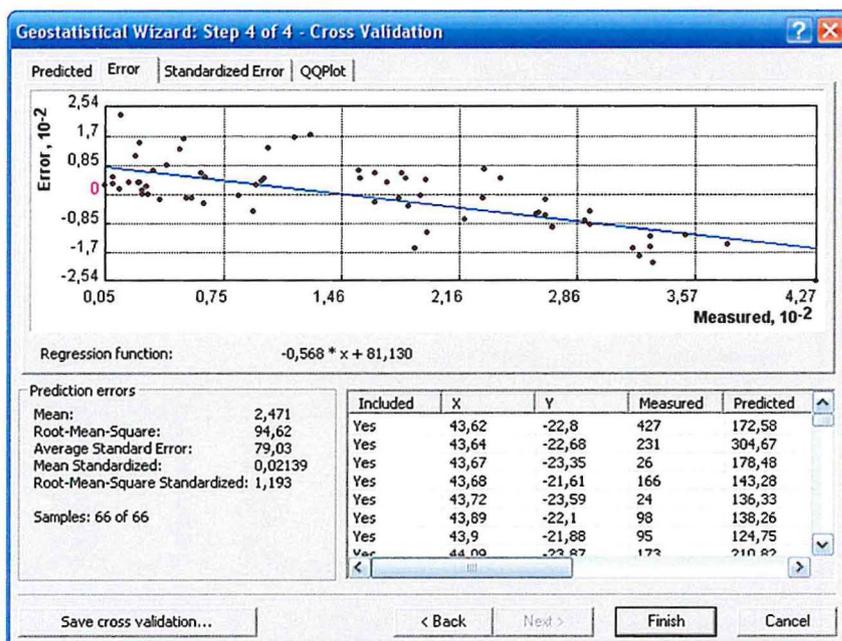


Figure 15 : Affichage des résultats obtenus au test de validation croisée dans le module Geostatistical Wizard

Les résultats individualisés (chaque point de mesure) sont présentés dans la table qui apparaît (pour partie) en bas à droite de la fenêtre.

Le bouton « Save cross validation » permet d'exporter ces résultats dans une table .dbf. La table exportée est présentée en figure 16.

Attributes of CrossValidationResult

oid	X	Y	Measured	Predicted	StdError	Error	Stdd Error	NormValue
0	43,62	-22,8	427	172,583341	79,219775	-254,416659	-3,21153	-2,428737
1	43,64	-22,68	231	304,674887	79,499011	73,674887	0,92674	1,062786
2	43,67	-23,35	26	178,484303	85,788514	152,484303	1,777444	1,616156
3	43,68	-21,61	166	143,275982	102,890423	-22,724018	-0,220856	-0,451658
4	43,72	-23,59	24	136,329842	85,25666	112,329842	1,317549	1,290233
5	43,89	-22,1	98	138,257093	83,910778	40,257093	0,479761	0,328645
6	43,9	-21,88	95	124,753793	82,835379	29,753793	0,359192	0,057
7	44,09	-23,87	173	210,819441	79,125072	37,819441	0,47797	0,288809
8	44,14	-23,65	319	164,480051	76,215636	-154,519949	-2,027405	-1,48947
9	44,23	-24,22	182	246,355321	81,00029	64,355321	0,794507	0,825494
10	44,32	-22,53	52	215,514473	97,741477	163,514473	1,672928	1,382994
11	44,38	-23,72	262	205,85616	73,470826	-56,14384	-0,764165	-0,722972
12	44,42	-23,12	331	130,71969	86,735376	-200,28031	-2,309096	-2,000424
13	44,43	-24,17	264	212,527771	73,937176	-51,472229	-0,696162	-0,67449
14	44,44	-23,57	219	148,436825	67,430426	-70,563175	-1,046459	-0,880132
15	44,46	-23,53	15	248,704274	69,127453	233,704274	3,380774	2,428737
16	44,52	-24,35	230	221,281299	70,820422	-8,718701	-0,12311	-0,210428
17	44,53	-24,55	323	143,812955	79,74411	-179,187045	-2,247025	-1,77585
18	44,63	-25,11	42	130,001762	93,770148	88,001762	0,938484	1,13214
19	44,67	-24,3	157	206,862018	69,578032	49,862018	0,716634	0,67449
20	44,8	-24,27	180	169,453239	70,507336	-10,546761	-0,149584	-0,328645
21	44,83	-23,02	156	227,401273	95,160385	71,401273	0,750326	0,773217
22	44,9	-24,39	50	181,104196	73,844264	131,104196	1,775415	1,48947
23	44,97	-25,31	25	61,079797	77,379319	36,079797	0,466272	0,210428

Record: 1 Show: All Selected Records (1 out of 66 Selected) Options

Figure 16 : Table Database (.dbf) des résultats individualisés pour le test de validation croisée

2.2.4. Exploitation des résultats obtenus au test de validation croisée

Les résultats obtenus au test de validation croisée ont été utilisés pour comparer les performances des différents krigeages et modèles variographiques sur les jeux de données testés. Ce sont les indicateurs moyens pour l'ensemble du jeu de données qui ont été utilisés, à la fois concernant la précision moyenne de l'interpolation et concernant la qualité de l'estimation de l'incertitude.

Certains auteurs critiquent l'utilisation de la validation croisée pour sélectionner les paramètres de l'interpolation (Cressie 1993) et soutiennent que ceux-ci doivent être choisis en se basant sur l'expérience de l'utilisateur et les informations disponibles sur les données. D'autres auteurs considèrent au contraire qu'il s'agit de la méthode la plus raisonnable pour choisir les paramètres (Marcotte 1995) malgré l'ampleur des manipulations à réaliser. Dans notre objectif de sélection de paramètres interopérables et préférentiels¹², il s'agit, quoi qu'il en soit, de la seule méthodologie disponible.

2.2.4.1. Concernant la précision de l'interpolation

La précision de l'interpolation a été abordée par rapport à la précision obtenue pour la méthode de l'inverse de la distance (puisque l'un des objectifs sous-tendant ces travaux visent à disposer d'une interpolation au moins aussi précises que celle produite par la méthode de l'inverse de la distance).

De façon à chiffrer la précision (ou plutôt l'imprécision) moyenne de l'interpolation, la valeur moyenne des erreurs observées (*Mean Prediction Errors*) et l'écart-type des erreurs observées (*Root-Mean-Square Prediction Errors*) ont été additionnés¹³. Le résultat obtenu a ensuite été comparé à celui de la méthode de l'inverse de la distance pour mesurer la valeur de l'amélioration ou de la dégradation de la précision par rapport à celle-ci.

2.2.4.2. Concernant la fiabilité de l'estimation de l'incertitude

C'est le rapport des erreurs observées sur les erreurs potentielles estimées (*Root-Mean-Square Standardized Prediction Errors*) qui a été exploité.

2.2.4.3. Hiérarchisation de la sélection

Ces indices ont été utilisés tout d'abord pour sélectionner parmi les différents types de krigeage testé, lequel rassemble les meilleurs résultats (tous modèles variographiques confondus).

Une fois le type de krigeage préférentiel déterminé, ce sont les modèles variographiques qui ont été comparés, selon les mêmes modalités.

¹² Rappelons que cet objectif répond à la nécessité sur le plan opérationnel de simplifier l'exploitation de l'interpolation géostatistique pour des utilisateurs peu expérimentés et que cette nécessité est d'autant plus prégnante qu'en cas de paramètres inadéquates les performances de l'interpolation peuvent être très sérieusement compromises (pour la précision de l'interpolation et pour l'estimation de l'incertitude).

¹³ Les valeurs négatives pour la moyenne des erreurs observées (*Mean Prediction Errors*) ont préalablement été converties en valeurs positives de façon à ne pas minimiser l'imprécision moyenne de l'interpolation.

2.2.5. Les jeux de données utilisés :

2.2.5.1. Pour l'interpolation des données pluviométriques

Les contraintes pour le choix des données test étaient les suivantes :

- disposer de données caractérisant les différentes situations pluviométriques pouvant se produire sur l'aire grégarigène,
- disposer d'un nombre suffisant de points de mesure (relevés pluviométriques) (**voir figure 7**).

Les tests ont donc été réalisés sur les 3 jeux de données suivants :

- pour le début de saison des pluies : décembre 2006 (66 enregistrements allant de 5 mm à 427 mm de pluie)
- pour la fin de saison des pluies : mars 2005 (58 enregistrements allant de 0 mm à 412 mm de pluie)
- pour la saison sèche : juillet 2002 (43 enregistrements allant de 0 mm à 69 mm de pluie)

Ces 3 jeux de données se caractérisent par une répartition spatiale des pluies très différente, et représentative des grands schémas pluviométriques dans le sud malgache (**voir figure 17**).

Les données pluviométriques des mois de décembre 2006, mars 2005, et juillet 2002

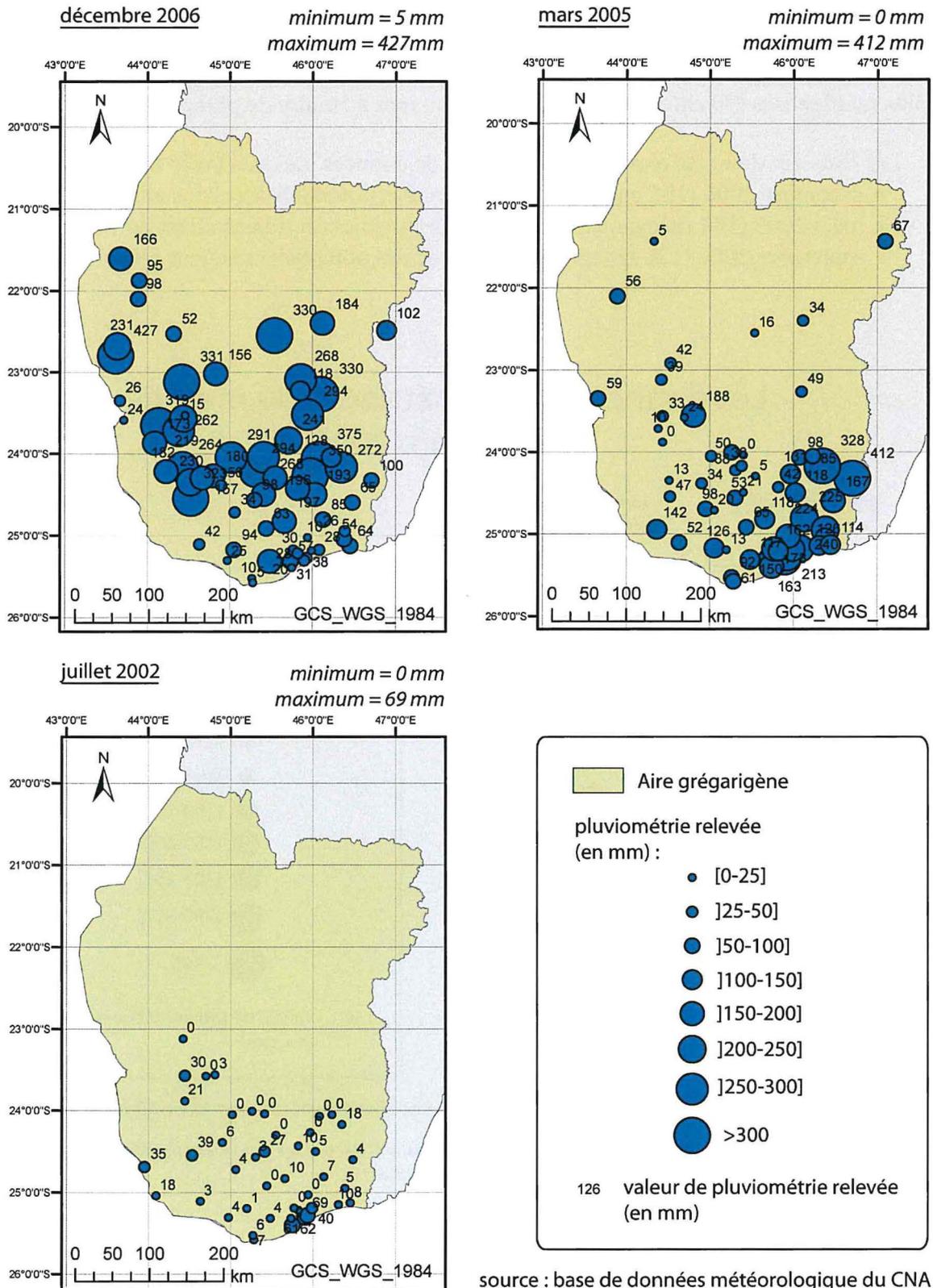


Figure 17 : Cartes de répartition des valeurs de pluviométrie sur les jeux de données testés

2.2.5.2. Pour l'interpolation des données acridiennes

Compte tenu du fait que le cokrigeage sera testé avec pour variable secondaire une carte isohyète, les jeux de données testés concernent les mêmes mois que les jeux de données utilisés pour comparer l'interpolation des données pluviométriques, à l'exception du mois de juillet 2002 pour lequel aucune prospection acridienne n'était enregistrée dans la base de données du CNA. Ce mois de juillet a été remplacé par le mois de septembre 2006 qui représente sur le plan des données pluviométriques l'un des mois pour lequel les données sont les plus nombreuses (70 enregistrements allant de 0 mm à 56 mm de pluie, voir figure 18).

Les tests ont donc été réalisés sur les 3 jeux de données suivants (voir figure 19) :

- décembre 2006 (105 enregistrements avec des potentiels acridiens allant de 1 à 4)
- mars 2005 (104 enregistrements avec des potentiels acridiens allant de 1 à 4)
- septembre 2006 (126 enregistrements avec des potentiels acridiens allant de 1 à 2)

Les données pluviométriques du mois de septembre 2006

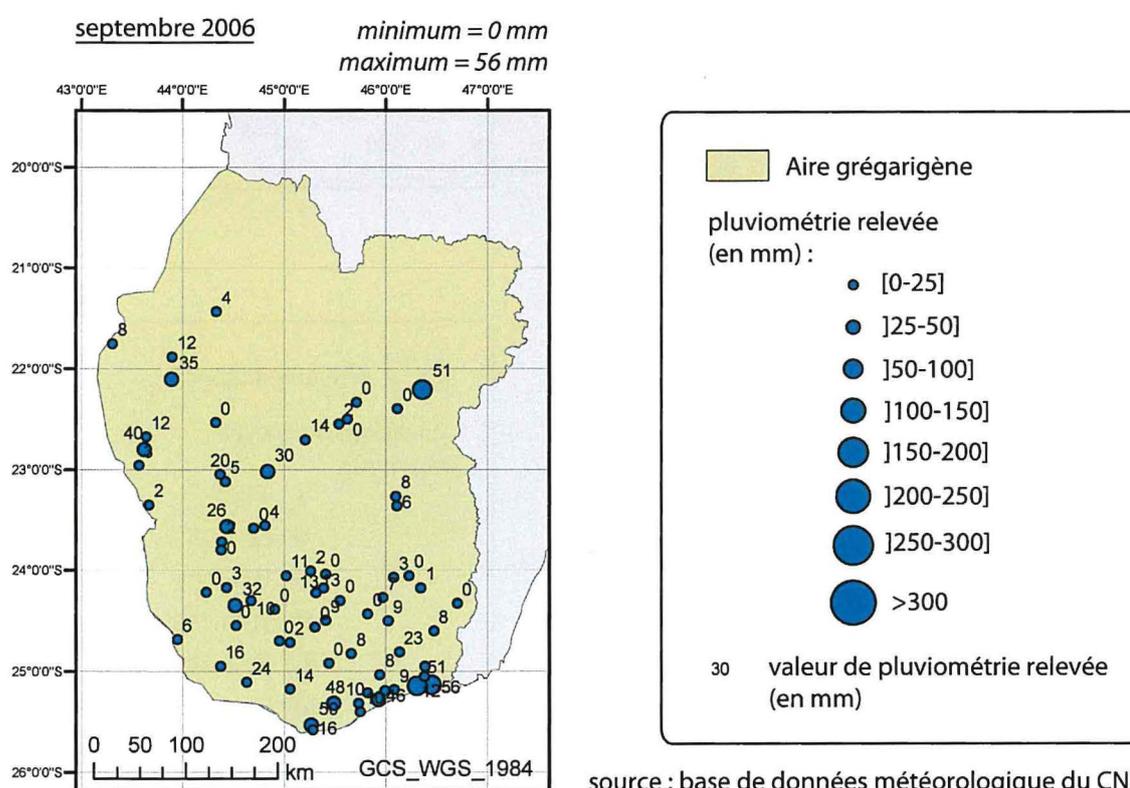


Figure 18 : Carte de répartition des valeurs de pluviométrie sur les données supplémentaires de septembre 2006

Les données acridiennes des mois de décembre 2006, mars 2005, et septembre 2006

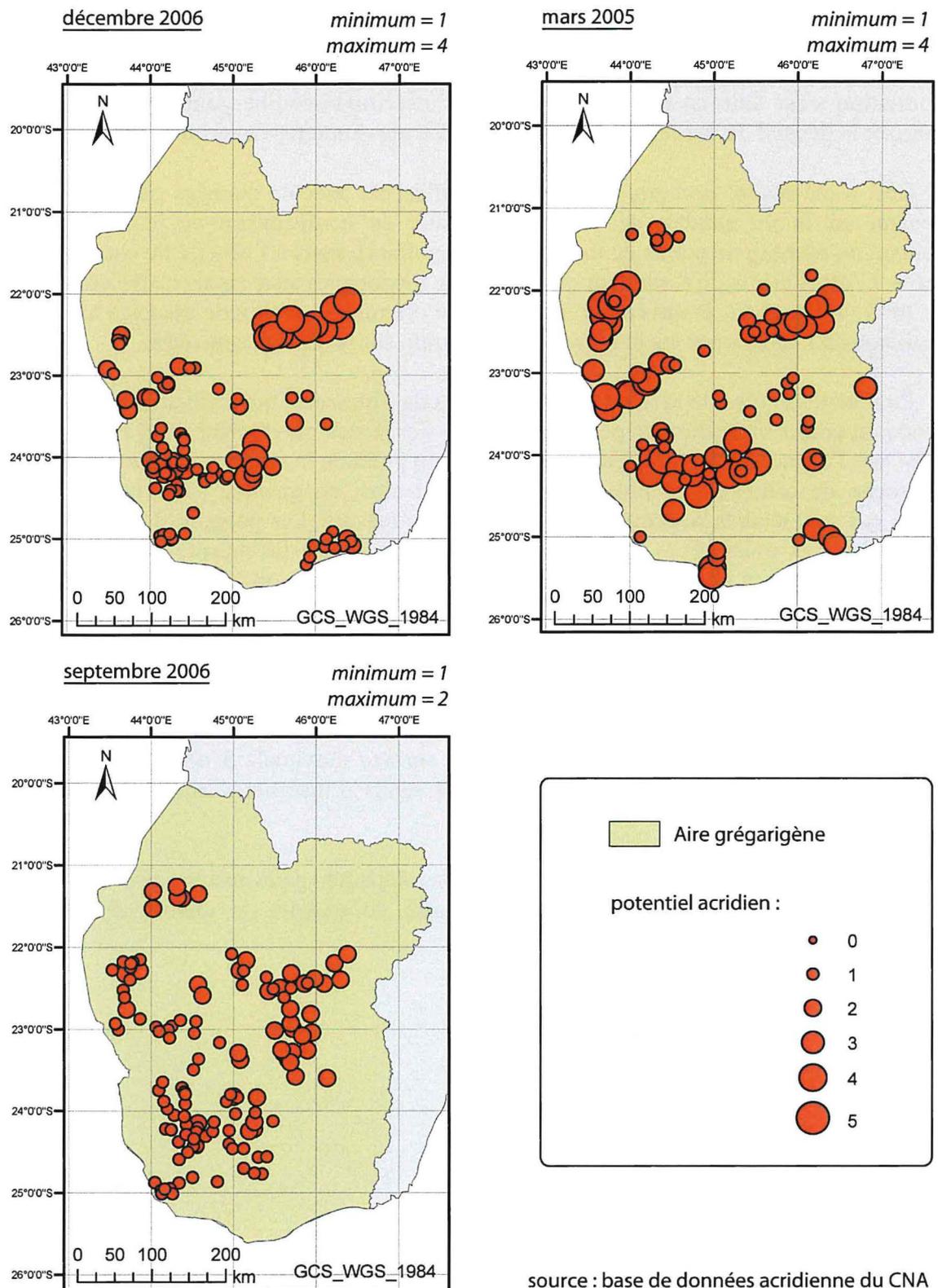


Figure 19 : Carte de répartition des potentiels acridiens sur les jeux de données testés

2.3. Méthodologie pour la détermination de réseaux minimaux de collecte de l'information sur le terrain

2.3.1. Cas des données pluviométriques

2.3.1.1. L'exploitation des polygones de Thiessen

Pour les données pluviométriques, la détermination d'un réseau minimal de collecte de l'information s'est faite en mettant en relation l'incertitude établie pour différents jeux de données et la densité du maillage du territoire par les pluviomètres de terrain.

Ceci a été réalisé non pas à l'échelle de différents jeux de données (jeux de données présentant un faible nombre de points de mesure en comparaison de jeux de données présentant un nombre de points de mesure plus important), mais à l'échelle de chaque jeux de données. C'est-à-dire qu'à l'intérieur de chaque jeu de données testé (mois de décembre 2005, mars 2005, juillet 2002, et novembre 2006¹⁴) a été calculée l'incertitude associée à la densité du maillage de l'espace par les pluviomètres de terrain sur le secteur considéré.

Pour ce faire, c'est la méthode des polygones de Thiessen¹⁵ qui a été utilisée. Avec cette méthode on construit autour des points de mesure (ici postes pluviométriques) des polygones qui divisent l'espace de façon à déterminer, pour tout point de la surface, le point de mesure le plus proche de celui-ci. Les polygones définissent ainsi en quelque sorte les portions de l'espace qui sont sous la responsabilité d'un point de mesure. Les polygones sont formés par l'intersection des médiatrices des droites joignant des points de mesure adjacents (postes pluviométriques). Les polygones de Thiessen pour les jeux de données testés sont présentés en **figure 20**.

La surface de chaque polygone de Thiessen a été calculée, fournissant ainsi une mesure reflétant la densité du maillage de l'espace par les pluviomètres de terrain. Puis l'incertitude moyenne sur chacun de ces polygones a été calculée. Et enfin surface et incertitude moyenne ont été mises en relation de façon à dégager la surface maximale à ne pas dépasser pour chaque polygone de Thiessen afin de garantir les seuils d'incertitude souhaités (voir partie 2.3.1.2 suivante).

A partir de cette surface maximale à ne pas dépasser peut ensuite être déterminé le nombre de postes pluviométriques nécessaire afin de garantir la qualité de la couche d'information pluviométrique.

¹⁴ Il s'agit d'un jeu de données supplémentaire. Utilisé ici car le jeu de données de novembre 2006 est l'un des 2 jeux de données contenant le plus grand nombre d'enregistrement (75). Pour les valeurs de pluviométrie relevées en novembre 2006 : se référer à la **figure 29**.

¹⁵ La méthode des polygones de Thiessen est également appelée tessellation de Voronoï. Une option du module Geostatistical Analyst permet de visualiser les polygones de Thiessen, le terme utilisé par le logiciel est celui de Voronoï.

Polygones de Thiessen pour
les données des mois de
décembre 2006, mars 2005,
juillet 2002, et novembre 2006

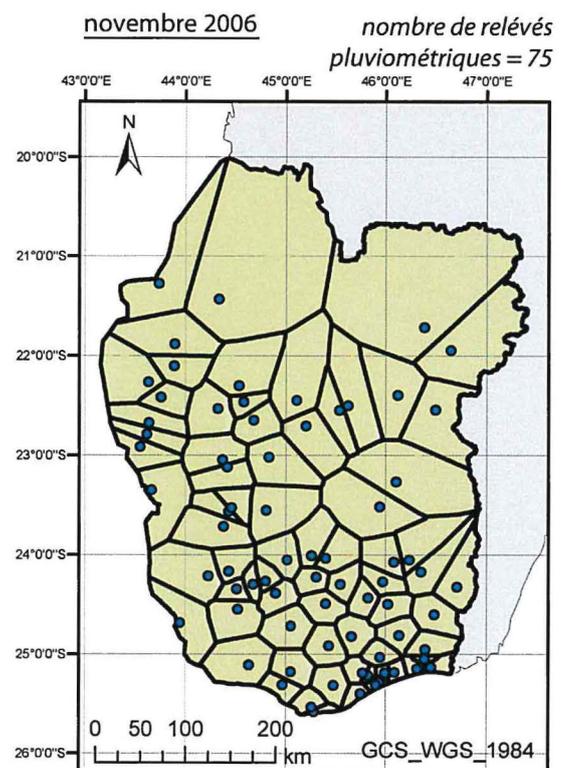
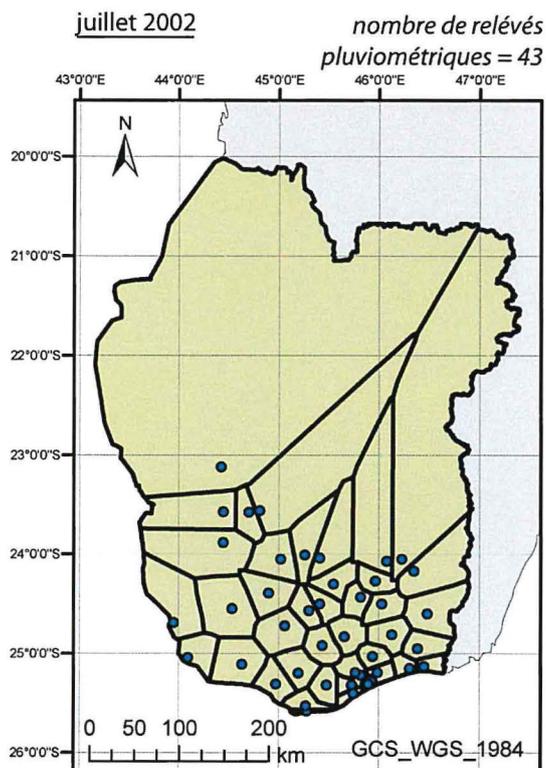
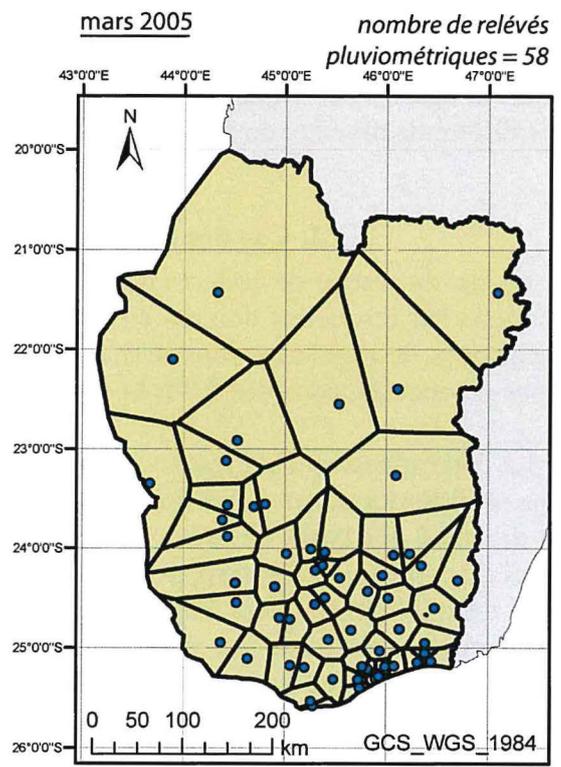
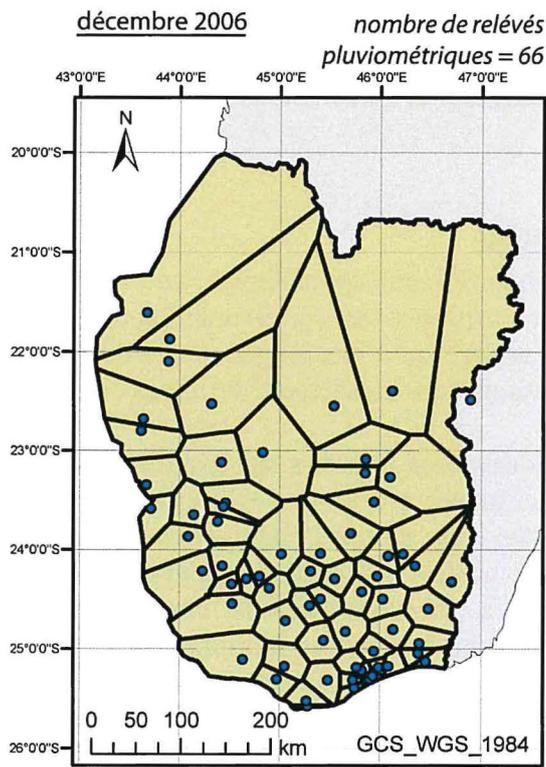
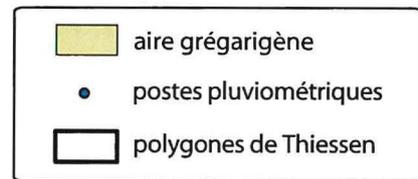


Figure 20 : Maillage de l'espace par les pluviomètres de terrain sur les jeux de données de décembre 2006, mars 2005, juillet 2002, et novembre 2006

2.3.1.2. Les seuils d'incertitude minimaux et optimaux

Compte tenu du fait que la Plage Optimale Pluviométrique (POP) pour le développement du Criquet migrateur malgache se situe entre 50 et 150 mm de pluie le seuil d'incertitude optimal à ne pas dépasser a été fixé à 25mm. En relation avec la difficulté d'obtenir un tel niveau de précision sur un espace aussi vaste que l'aire grégarigène (environ 185 000 km²), un seuil d'incertitude minimal a également été fixé, avec pour valeur 50mm. Au-delà de 50mm d'incertitude le diagnostic de risque apparaît totalement remis en cause, en tout cas eut égard à ses objectifs de finesse de localisation et de calcul des surfaces concernées par les différents niveaux de risque.

2.3.2. Cas des données acridiennes

Le cas du réseau de collecte de l'information acridienne est différent. La détermination des stations sur lesquelles doivent être réalisées les prospections acridiennes répond moins à des exigences de régularité dans le maillage de l'espace qu'à des exigences de diversité des biotopes prospectés, censés refléter la diversité naturelle sur les secteurs acridiens considérés.

La détermination d'un réseau minimal s'est donc basé, non pas sur une mise en relation de type mathématique entre maillage du territoire et incertitude associée à l'interpolation mais sur la diversité des types de biotopes prospectés. De cette façon, l'établissement d'un réseau minimal de collecte de l'information acridienne a consisté à établir le pourcentage minimal de stations devant fournir, pour chaque secteur acridien, des informations, compte tenu de la saison (laquelle détermine une trame globale influençant la position latitudinale des criquets) (**voir tableau 4**). Cette estimation des pourcentages minimaux a été déterminée par l'expert senior du projet.

les saisons dans le Sud-Ouest malgache

O	N	D	J	F	M	A	Ma	J	Jt	A	S
trans- -ition	saison des pluies						trans- -ition	Saison sèche			

aires	compartiments	secteurs	mois											
			O	N	D	J	F	M	A	Ma	J	Jt	A	S
AGT	NO	1												
	C/E	2												
AMI	NO	3												
	C	4												
	S	5												
ATM	NO	6												
	C	7												
	S	8												
AD	NO	9												
	C	10												
	S	11												

% minimal de stations acridiennes à prospector suivant la saison et les secteurs afin de développer l'avertissement acridien

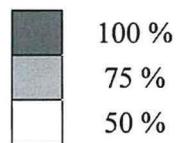


Tableau 4 : Besoins minimaux en information acridienne, pour chaque secteur et par saisons

2.4. Méthodologie pour la réalisation de l'outil « QualitéDiagnostic »

L'Outil « Qualité Diagnostic » vise à renseigner sur la fiabilité du diagnostic de risque établi par le SIG en s'intéressant à la qualité des couches d'informations pluviométriques et acridiennes.

Il repose sur les réseaux minimaux de collecte de l'information définis et sur les méthodes d'interpolation géostatistiques préférentielles identifiées. Il se divise en 2 axes principaux :

- le calcul d'indicateurs objectivement vérifiables (IOV) concernant la part remplie des besoins minimaux sur le plan de la quantité d'information de terrain collectée,
- la spatialisation de l'incertitude associée à l'interpolation.

Il a été réalisé grâce à au module Model Builder d'ArcGIS qui permet de programmer une suite d'opérations et de traitements sur les données (voir figure 21).

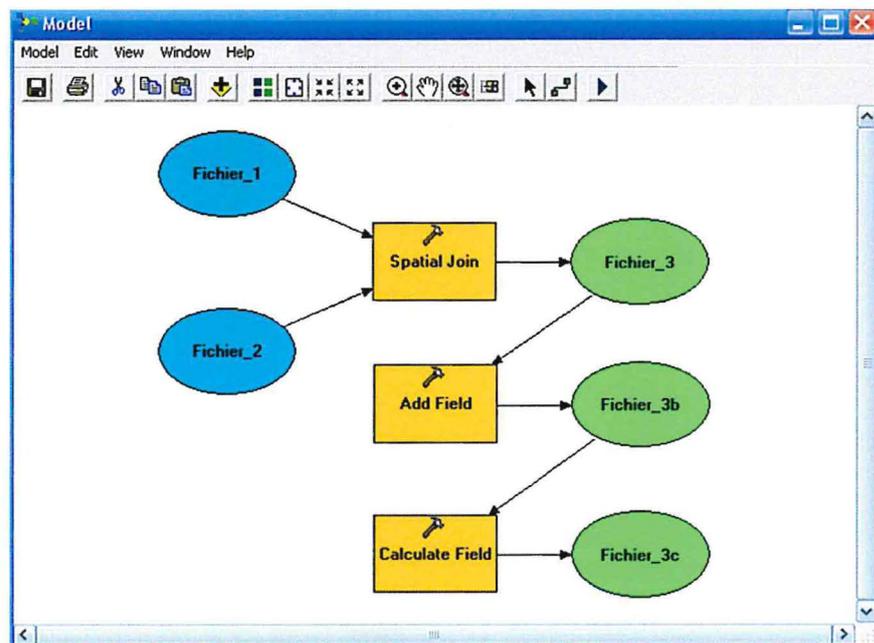


Figure 21 : Fenêtre du Model Builder d'ArcGIS permettant de programmer une suite d'opérations sur les données

Il se présente sous la forme d'une Boîte à outils ESRI (*Toolbox*) contenant 3 applications :

- La première compare les données fournies pour chaque couche d'information et les besoins minimaux pour garantir une fiabilité minimale. Le résultat est une table pour chaque couche d'information. En relation avec les caractéristiques des réseaux minimaux définis, les données pluviométriques sont traitées à l'échelle de l'ensemble de l'aire grégariène tandis que les données acridiennes sont traitées à l'échelle de chaque secteur acridien.
- La seconde application produit des cartes d'incertitude pour chaque couche d'information. Les résultats sont au format Geostatistical Analyst Layer.

- La troisième application exporte les layers au format Shapefile et les découpe selon les limites de l'aire grégarigène.

L'outil stocke par ailleurs une symbologie de référence pour pouvoir, si souhaité, superposer les cartes d'incertitude à la carte de risque.

L'outil informe ainsi sur la fiabilité du diagnostic de risque et sur les zones dans lesquelles des prospections complémentaires doivent être organisées.

Les données d'entrée sont les tables de sortie des bases de données acridiennes et météorologiques du CNA. Son utilisation se fait sur le modèle des outils ArcGIS. Un mode d'emploi est fourni (**voir Annexe 6**).

3. Résultats

3.1. La sélection d'une méthode d'interpolation préférentielle

L'ensemble des graphiques évoqués dans cette partie sont présentés en **Annexe 4**.

3.1.1. Performances des méthodes géostatistiques sur le plan de la précision des interpolations

3.1.1.1. Résultats généraux

Le **graphique 1** compare les résultats au test de validation croisée sur le plan de la précision moyenne¹⁶ de l'interpolation obtenus pour les méthodes géostatistiques et pour la méthode de l'inverse de la distance, appliquées aux données pluviométriques. Le **graphique 2** est identique au **graphique 1** mais appliqué aux données acridiennes.

Dans les 2 graphiques, les résultats obtenus pour l'ensemble des types de krigeage (ordinaire, simple, universel, et disjonctif) et l'ensemble des paramètres (modèles variographiques, dérive et anisotropie) sont regroupés. Ils sont présentés sous la forme de diagrammes en boîtes mettant en valeur leur distribution statistique. Ce sont les gains ou les pertes de précision par rapport à la méthode de l'inverse de la distance (en millimètres pour les données pluviométriques, en potentiel acridien pour les données acridiennes) qui sont représentés et non les valeurs brutes.

On observe sur le **graphique 1** que pour les données pluviométriques les méthodes géostatistiques peuvent améliorer la précision de l'interpolation ou fournir une précision équivalente à celle de la méthode de l'inverse de la distance quel que soit le jeu de données testé. On observe la même chose sur le **graphique 2** pour les données acridiennes. Dans le cas des données pluviométriques, le **graphique 1** illustre également que certaines variantes peuvent par contre produire de très fortes imprécisions. Dans le cas des données acridiennes, sur le **graphique 2**, les plus mauvais résultats demeurent par contre tout de même équivalents aux résultats de la méthode de l'inverse de la distance.

¹⁶ moyenne (*Mean Prediction Error*) + écart-type (*Root-Mean-Square Prediction Errors*) des erreurs observées.

De façon générale, que cela soit pour les données pluviométriques ou pour les données acridiennes, il faut remarquer que les gains de précision sont faibles, ne dépassant pas 8,5 mm pour les données pluviométriques et 0,12 classe de potentiel acridien pour les données acridiennes. Il n'en demeure pas moins que les **graphiques 1 et 2** montrent que les performances des méthodes géostatistiques sur le plan de la précision des interpolations peuvent s'avérer au moins équivalentes à celles de la méthode de l'inverse de la distance. Ceci permet donc d'envisager leur exploitation au sein du SIG ; cette exploitation ayant l'avantage de permettre de produire parallèlement aux interpolations une carte d'incertitude concernant les valeurs interpolées.

Le **graphique 1** montre cependant l'importance des paramétrages puisque les pertes de précision peuvent être très élevées si ceux-ci ne sont pas en rapport avec les caractéristiques des données.

3.1.1.2. L'importance du modèle variographique et des options choisies

Les **graphiques 3, 4, et 5**, représentent et comparent, pour les données pluviométriques et pour chacun des 3 mois testés, les performances des différents modèles variographiques et des paramètres de dérive et anisotropie appliqués au krigeage ordinaire.

Ces graphiques démontrent que les paramétrages optimaux, comme ceux les moins appropriés, varient en fonction du jeu de données. Leur incidence sur l'interpolation peut être positive ou négative en fonction de leur adéquation avec les caractéristiques des données.

3.1.1.3. Conséquences opérationnelles

Au total, les méthodes géostatistiques proposées sous ArcGIS peuvent donc fournir des interpolations de meilleure précision ou de précision équivalente à la méthode de l'inverse de la distance. Elles peuvent cependant aussi produire des interpolations totalement erronées. La qualité de l'interpolation dépend des paramétrages utilisés.

Les paramétrages optimaux varient selon le jeu de données. Leur identification et leur manipulation sont complexes, tout particulièrement pour un utilisateur non expérimenté. Dans un objectif opérationnel, se pose donc la question de savoir s'il est possible d'identifier un paramétrage garantissant des performances acceptables quel que soit le jeu de données et dont l'usage pourrait ainsi être systématisé.

3.1.2. Identification de paramétrages interopérables quel que soit le jeu de données pour chaque couche d'information

3.1.2.1. Pour les données pluviométriques

3.1.2.1.1. Choix du type de krigeage

Performances sur le plan de la précision

Le **graphique 6** et le **graphique 7** comparent les résultats obtenus sur le plan de la précision des interpolations pour le krigeage ordinaire et pour le krigeage simple, tous modèles variographiques confondus. Ce sont les gains ou les pertes de précision par rapport à la méthode de l'inverse de la distance (en millimètres) qui sont représentés et non les valeurs

brutes. Le **graphique 6** présente les résultats pour l'ensemble des jeux de données testés. Le **graphique 7** présente les résultats obtenus chaque mois.

On observe sur le **graphique 6** que l'ensemble des résultats obtenus pour le krigeage ordinaire sont meilleurs que ceux obtenus pour le krigeage simple.

Le **graphique 7** vient nuancer quelque peu ces résultats globaux puisque l'on y observe que pour le mois de décembre 2006, les résultats du krigeage simple sont globalement meilleurs que ceux du krigeage ordinaire. Pour les données de juillet 2002 et de mars 2005, c'est par contre le krigeage ordinaire qui propose les meilleurs résultats. L'écart le plus important entre les deux krigeages est observé pour juillet 2002¹⁷. Pour les 2 autres jeux de données les écarts entre les deux krigeages ne sont pas particulièrement significatifs.

Par rapport à la méthode de l'inverse de la distance, les améliorations proposées par le krigeage simple sont faibles (1 mm au maximum). Par contre les pertes en précision avec ce krigeage peuvent être relativement élevées (jusqu'à 11 mm en décembre 2006) et surtout peuvent s'avérer généralisées (en juillet 2002 le meilleur résultat obtenu présente tout de même un déficit en précision de 4 mm par rapport à la méthode de l'inverse la distance).

Pour le krigeage ordinaire, l'amélioration de la précision par rapport à la méthode de l'inverse de la distance n'est pas très élevée : au mieux 4 mm (juillet 2002). Néanmoins dans 2 jeux de données 90 à 100 % des modèles variographiques ont proposé des résultats meilleurs que ceux de la méthode de l'inverse de la distance. Le plus mauvais résultat obtenu avec le krigeage ordinaire (décembre 2006) tourne autour de 5 mm de déficit en précision par rapport à la méthode de l'inverse de la distance. Mais sur ces données 25% des modèles variographiques proposent un déficit en précision par rapport à la méthode de l'inverse de la distance inférieur ou égal à 2mm et donc peu significatif.

Au total, bien que la différence dans les résultats observés pour le krigeage simple et le krigeage ordinaire ne soit pas toujours très significative, le krigeage ordinaire ressort tout de même gagnant de cette comparaison, en ce qui concerne la précision de l'interpolation.

Fiabilité de l'estimation de l'incertitude

Le **graphique 8** et le **graphique 9** comparent les résultats obtenus sur le plan de la fiabilité de l'estimation de l'incertitude pour le krigeage ordinaire et pour le krigeage simple, tous modèles variographiques confondus. Le **graphique 8** présente les résultats pour l'ensemble des jeux de données testés. Le **graphique 9** présente les résultats obtenus pour chaque mois.

On observe sur le **graphique 8** que les résultats pour le krigeage simple sont plus condensés autour de la valeur 1 (valeur signifiant une estimation parfaite) que pour le krigeage ordinaire. Par contre certains résultats obtenus avec le krigeage simple témoignent d'une forte sous-estimation des erreurs potentielles, tandis que pour le krigeage ordinaire, les résultats les plus éloignés de la valeur 1 se rapportent plutôt à une surestimation.

Le **graphique 9** fait apparaître qu'à l'échelle de chaque jeu de données les résultats pour le krigeage ordinaire sont plus condensés que ceux pour le krigeage simple. Pour le

¹⁷ 9 mm d'écart entre les médianes, 3 mm entre le plus mauvais résultat pour le krigeage ordinaire et le meilleur résultat pour le krigeage simple

krigeage simple le choix du modèle variographique influe donc beaucoup plus sur la fiabilité de l'estimation de l'incertitude que pour le krigeage ordinaire.

De façon générale, hormis pour le mois de juillet 2002, les résultats du krigeage simple ne permettent pas de dire que ce krigeage est plus performant que le krigeage ordinaire sur le plan de l'estimation de l'incertitude. Pour le mois de mars 2005 c'est même le krigeage ordinaire qui se montre le plus performant. Les résultats obtenus pour le krigeage ordinaire en juillet 2002, s'ils souffrent d'un éloignement par rapport à la valeur 1 recherchée, révèle une surestimation des erreurs potentielles. Sur un plan opérationnel et dans une logique de relativisation de la confiance accordable au diagnostic de risque établi par le SIG, la surestimation de l'incertitude apparaît préférable à la sous-estimation.

Au total, compte tenu de ses performances sur le plan de la précision des interpolations et de la fiabilité de l'estimation de l'incertitude, le krigeage ordinaire ressort donc gagnant de la comparaison avec le krigeage simple sur les 3 jeux de données testés. C'est avec le krigeage ordinaire que seront maintenant comparées les performances des différents modèles variographiques.

3.1.2.1.2. Choix du modèle variographique

Performances sur le plan de la précision

Le **graphique 10** compare les résultats obtenus sur le plan de la précision de l'interpolation pour chaque modèle variographique, appliqué au krigeage ordinaire, sur chaque jeu de données testé.

Deux modèles variographiques se dégagent pour produire la meilleure précision à l'échelle des 3 jeux de données : il s'agit des modèles *circular* et *exponential*. Certes, suivant les jeux de données considérés, les performances de ces modèles variographiques peuvent être améliorées, néanmoins ils sont ceux fournissant les meilleurs résultats pour les 3 jeux de données considérés ensembles. D'autre part, leurs résultats apparaissent plutôt bons puisque les plus mauvais révèlent un déficit de précision par rapport à la méthode de l'inverse de la distance de seulement 1 mm. Les performances de ces modèles variographiques sur le plan de la précision des interpolations sont donc, au pire, équivalentes à celles de la méthode de l'inverse de la distance.

Si pour les mois de décembre 2006 et de juillet 2002 les deux modèles variographiques produisent des résultats très similaires, les données du mois de mars 2005 montrent une meilleure performance du modèle *circular*.

Fiabilité de l'estimation de l'incertitude

Le **graphique 11** compare les résultats obtenus sur le plan de la fiabilité de l'estimation de l'incertitude pour chaque modèle variographique, appliqué au krigeage ordinaire, pour chaque jeu de données testé.

Pour un mois donné, les performances des différents modèles variographiques varient peu. Néanmoins, le modèle variographique produisant les meilleurs résultats est le modèle *hole effect*. Les performances de ce modèle sur le plan de la précision des interpolations ne lui permettent toutefois pas de concurrencer le modèle *circular*. Il faut noter que le modèle *exponential* est, notamment en mars 2005, moins performant que le modèle *circular*.

Au total, compte tenu des performances sur le plan de la précision des interpolations et sur le plan de la fiabilité de l'incertitude, le modèle variographique proposant les meilleurs résultats est le modèle *circular*.

3.1.2.1.3. Conclusion

La combinaison krigeage ordinaire - modèle variographique *circular* a fourni les meilleurs résultats sur le plan des 2 critères de performance considérés : précision et fiabilité de l'estimation de l'incertitude. Les performances de ce couple sont de plus suffisamment bonnes pour être jugées interopérables dans le contexte climatique du sud malgache. Dans l'objectif d'un usage systématique d'un seul type de krigeage et d'un seul modèle variographique pour l'interpolation des données pluviométriques, cette combinaison krigeage ordinaire - modèle variographique *circular* apparaît donc la mieux adaptée. Les **figures 22 à 24** présentent les surfaces (carte isohyète et carte d'incertitude) produites avec ces paramètres.

3.1.2.2. Pour les données acridiennes

3.1.2.2.1. Choix du type de krigeage

Performances sur le plan de la précision

Le **graphique 12** et le **graphique 13** comparent les résultats obtenus sur le plan de la précision des interpolations pour le krigeage ordinaire et pour le krigeage simple, tous modèles variographiques confondus. Ce sont les gains ou les pertes de précision par rapport à la méthode de l'inverse de la distance (en potentiel acridien) qui sont représentés et non les valeurs brutes. Le **graphique 12** présente les résultats pour l'ensemble des jeux de données testés. Le **graphique 13** présente les résultats obtenus chaque mois.

Ces 2 graphiques montrent que les résultats obtenus sur le plan de la précision des interpolations sont très similaires entre les 2 krigeages et ne permettent pas d'orienter un choix préférentiel pour l'un d'entre eux.

Fiabilité de l'estimation de l'incertitude

Le **graphique 14** et le **graphique 15** comparent les résultats obtenus sur le plan de la fiabilité de l'estimation de l'incertitude pour le krigeage ordinaire et pour le krigeage simple, tous modèles variographiques confondus. Le **graphique 14** présente les résultats pour l'ensemble des jeux de données testés. Le **graphique 15** présente les résultats obtenus pour chaque mois.

Sur le **graphique 14**, aucune différence significative entre le krigeage ordinaire et le krigeage simple n'est visible. Le **graphique 15** fait pour sa part apparaître pour les données du mois de décembre 2006 des performances plus condensées pour le krigeage simple que pour le krigeage ordinaire. Néanmoins pour ces données, la majorité des résultats du krigeage ordinaire demeure similaire aux résultats du krigeage simple. Pour les 2 autres mois les résultats pour les 2 krigeages sont presque identiques.

Au total, le krigeage simple et le krigeage ordinaire fournissent à la fois sur le plan de la précision des interpolations et sur le plan de la fiabilité de l'estimation de l'incertitude des

performances similaires. C'est donc sur les 2 krigeages que les performances des modèles variographiques vont être comparées.

3.1.2.2.2. Choix du modèle variographique

Performances sur le plan de la précision

Le **graphique 16** compare les résultats obtenus sur le plan de la précision des interpolations pour chaque modèle variographique, appliqué au krigeage ordinaire, pour chaque jeu de données testé. Le **graphique 17** est identique au **graphique 16** mais les modèles variographiques y sont appliqués au krigeage simple.

Dans les 2 cas, le modèle variographique produisant les meilleurs résultats (tous jeux de données considérés ensemble) est le modèle *rational quadratic*. Néanmoins, de façon générale les performances des différents modèles variographiques sur le plan de la précision des interpolations sont très similaires voir identiques. L'écart le plus important entre 2 modèles variographiques est de seulement 0,04 classes de potentiel acridien, tant pour le krigeage ordinaire que pour le krigeage simple.

Fiabilité de l'estimation de l'incertitude

Les écarts observés dans la fiabilité de l'estimation de l'incertitude entre modèles variographiques sont par contre plus significatifs et mettent en lumière un modèle variographique préférentiel.

Le **graphique 18** compare les résultats obtenus sur le plan de la fiabilité de l'estimation de l'incertitude pour chaque modèle variographique, appliqué au krigeage ordinaire, pour chaque jeu de données testé. Le **graphique 19** est identique au **graphique 18** mais les modèles variographiques y sont appliqués au krigeage simple.

On observe sur ces graphiques que le modèle *gaussian* est celui produisant la meilleure estimation de l'incertitude, que cela soit pour chaque jeu de données ou, par conséquent, à l'échelle des 3 jeux de données considérés ensemble. La fiabilité de l'estimation de l'incertitude du modèle variographique *gaussian* est exactement la même qu'il soit utilisé avec le krigeage ordinaire ou avec le krigeage simple.

3.1.2.2.3. Performances du cokrigeage

Les **graphiques 20 et 21** comparent les performances du cokrigeage ordinaire avec celles du krigeage ordinaire et celles du cokrigeage simple avec le krigeage simple. Le modèle variographique utilisé est le modèle *gaussian*. Le **graphique 20** présente les résultats sur le plan de la précision de l'interpolation, et le **graphique 21** les résultats sur le plan de la fiabilité de l'estimation de l'incertitude.

On constate sur ces graphiques que le cokrigeage ne permet pas d'améliorer les performances des krigeages à une seule variable.

3.1.2.2.4. Conclusion

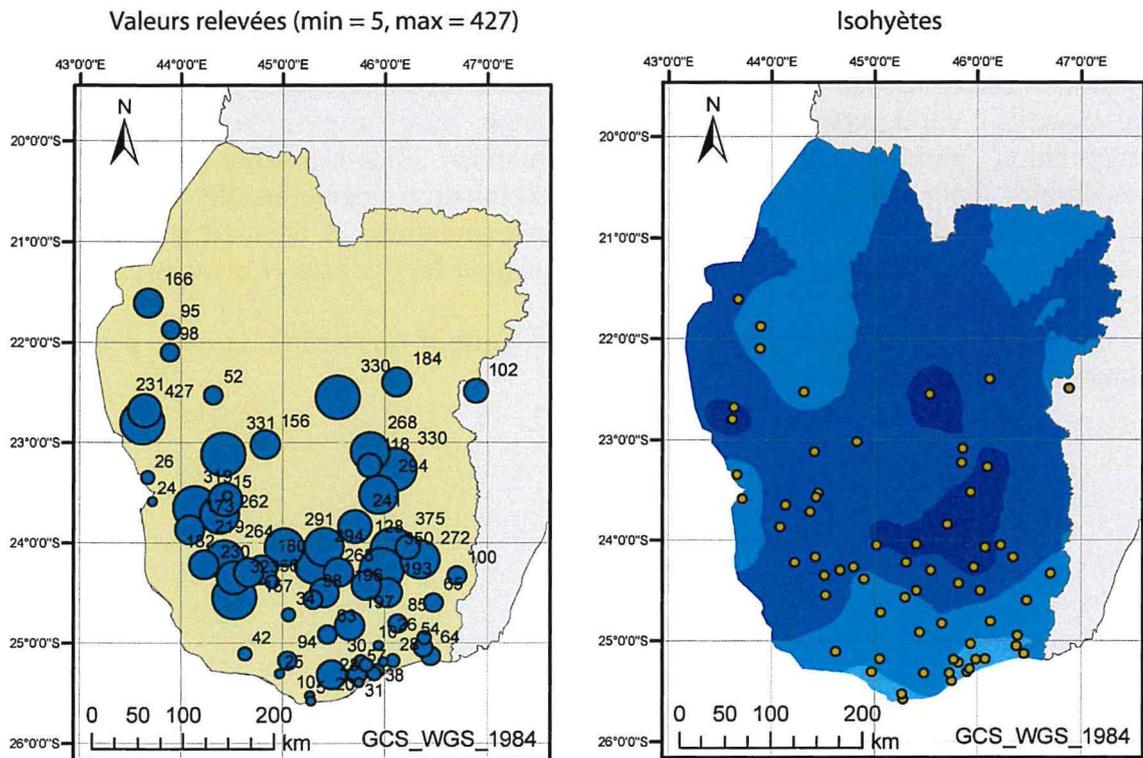
Au total, s'il est possible de dégager, grâce au critère de performance de la fiabilité de l'estimation de l'incertitude un modèle variographique préférentiel pour l'interpolation des données acridiennes, rien ne permet de réaliser le même diagnostic concernant le type de

krigeage. Krigeage ordinaire et krigeage simple, exploités avec le modèle variographique *gaussian*, proposent les mêmes performances sur le plan de la fiabilité de l'estimation de l'incertitude comme sur le plan de la précision des interpolations. Le cokrigeage n'est pas plus performant que les krigeages à une seule variable.

Les 2 combinaisons krigeage ordinaire-modèle variographique *gaussian* et krigeage simple-modèle variographique *gaussian* peuvent être exploitées comme méthode d'interpolation préférentielle. Puisque la démarche d'identification de paramétrages interopérables répond à l'objectif de faciliter l'exploitation opérationnelle de l'interpolation géostatistique, et de façon à homogénéiser les manipulations, il apparaît plus pertinent de choisir le krigeage ordinaire, également sélectionné pour les données pluviométriques.

Les **figures 25 à 27** présentent les surfaces (carte d'isopotential et carte d'incertitude) produites avec ces paramétrages.

L'information pluviométrique pour le mois de décembre 2006



Note : interpolation réalisée par krigeage ordinaire avec modèle variographique circulaire

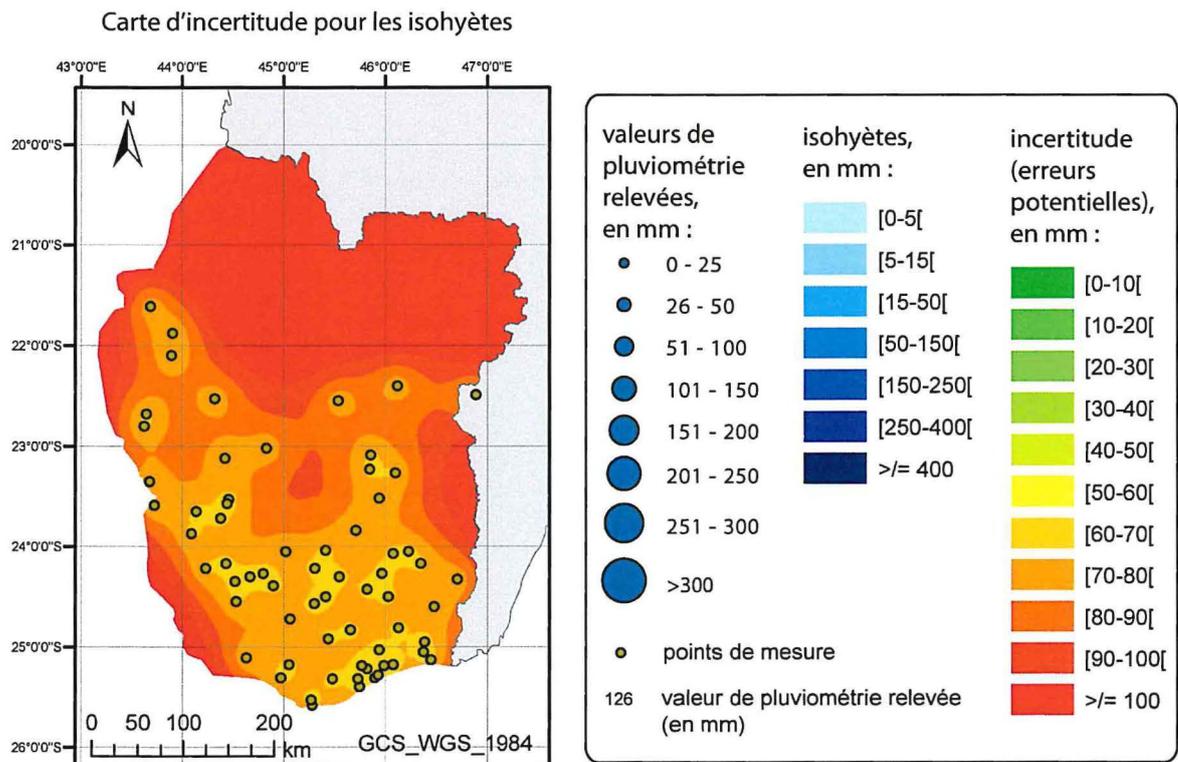


Figure 22 : Cartes des valeurs pluviométriques relevées, des isohyètes, et de l'incertitude associée à l'interpolation pour le mois de décembre 2006

L'information pluviométrique pour le mois de mars 2005

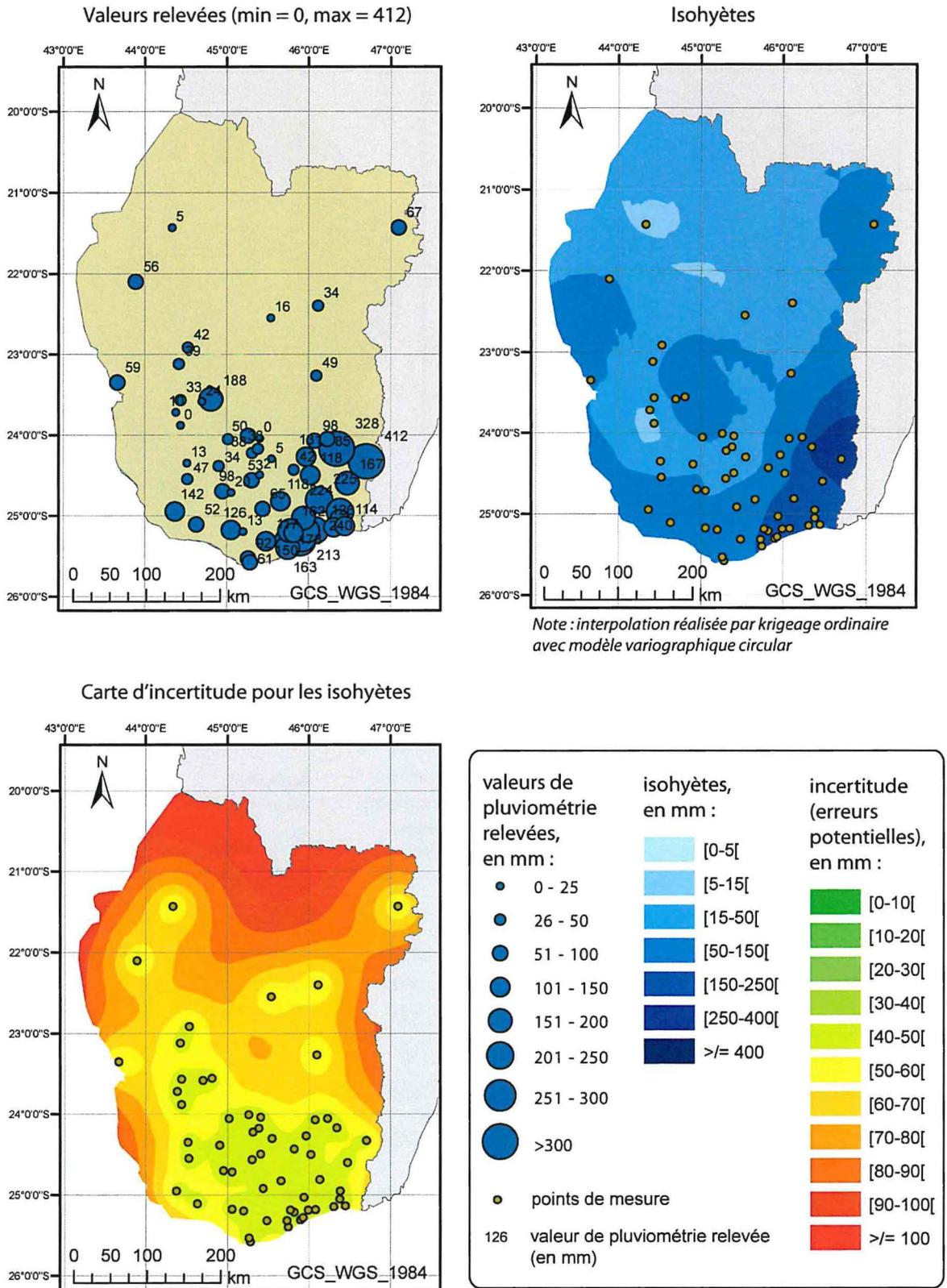


Figure 23 : Cartes des valeurs pluviométriques relevées, des isohyètes, et de l'incertitude associée à l'interpolation pour le mois de mars 2005

L'information pluviométrique pour le mois de juillet 2002

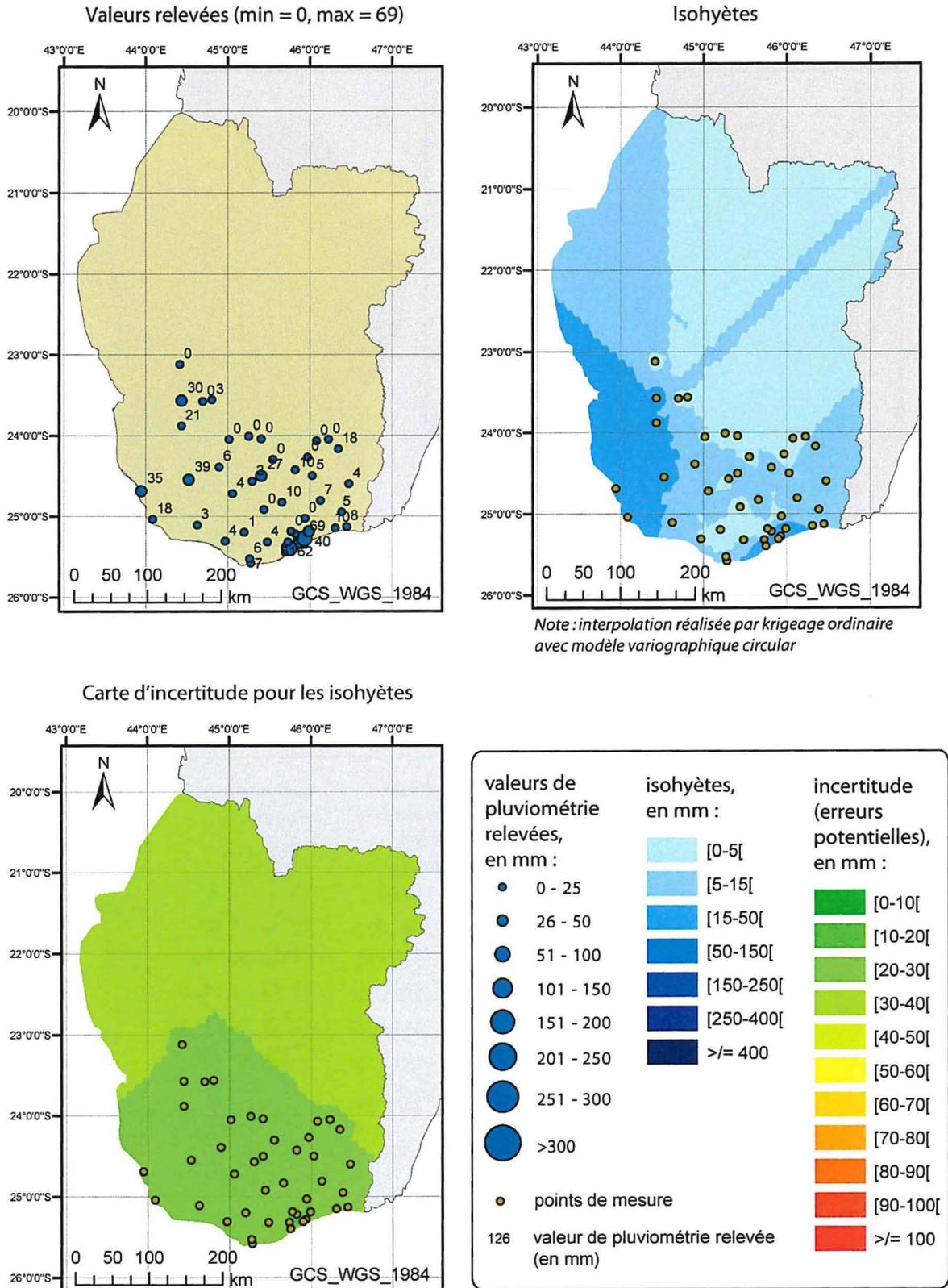


Figure 24 : Cartes des valeurs pluviométriques relevées, des isohyètes, et de l'incertitude associée à l'interpolation pour le mois de juillet 2002

L'information acridienne pour le mois de décembre 2006

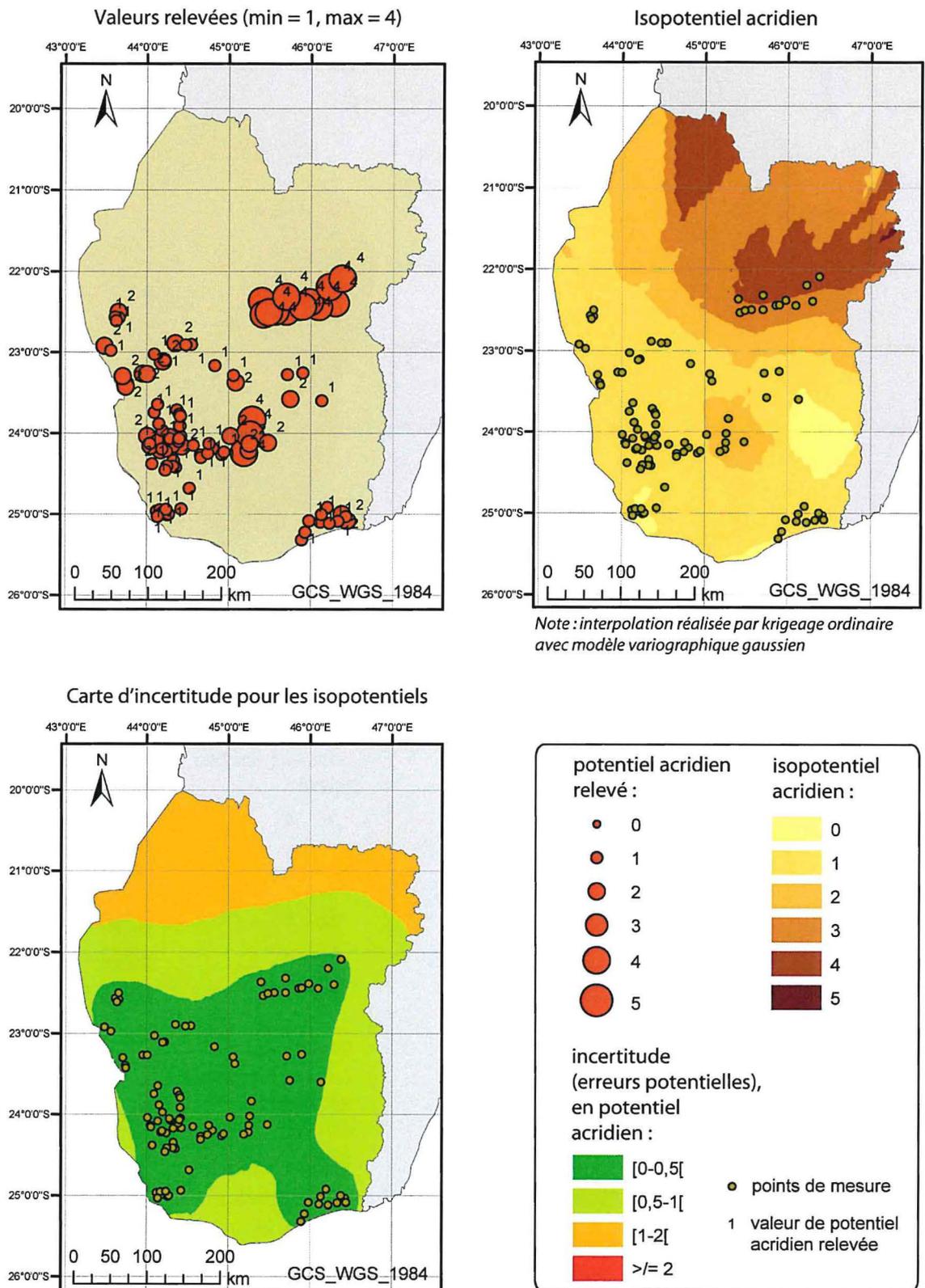
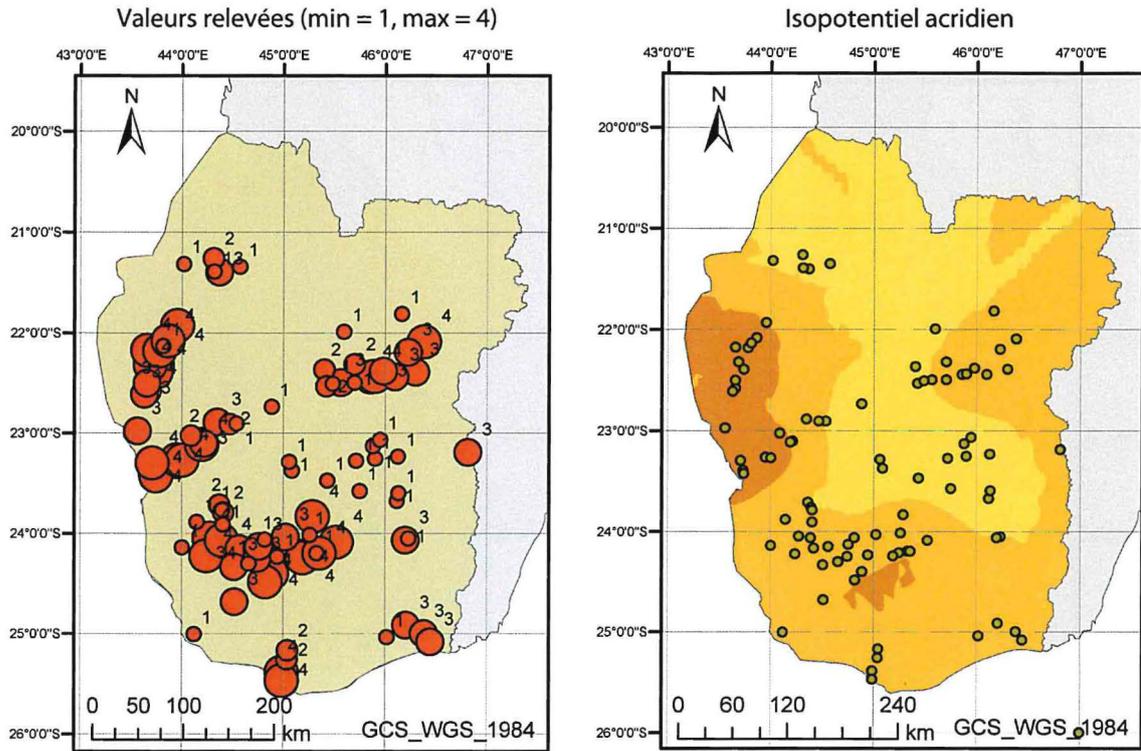


Figure 25 : Cartes des valeurs de potentiel acridien relevées, des isopotentiels acridiens, et de l'incertitude associée à l'interpolation pour le mois de décembre 2006

L'information acridienne pour le mois de mars 2005



Note : interpolation réalisée par krigeage ordinaire avec modèle variographique gaussien

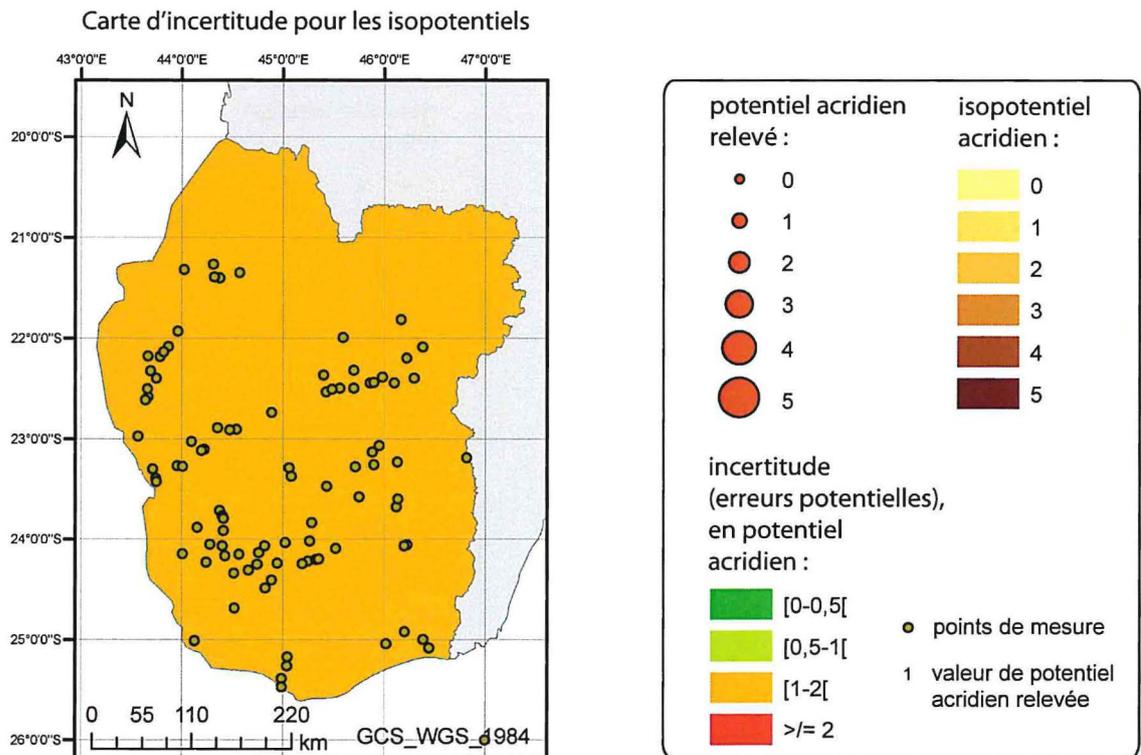
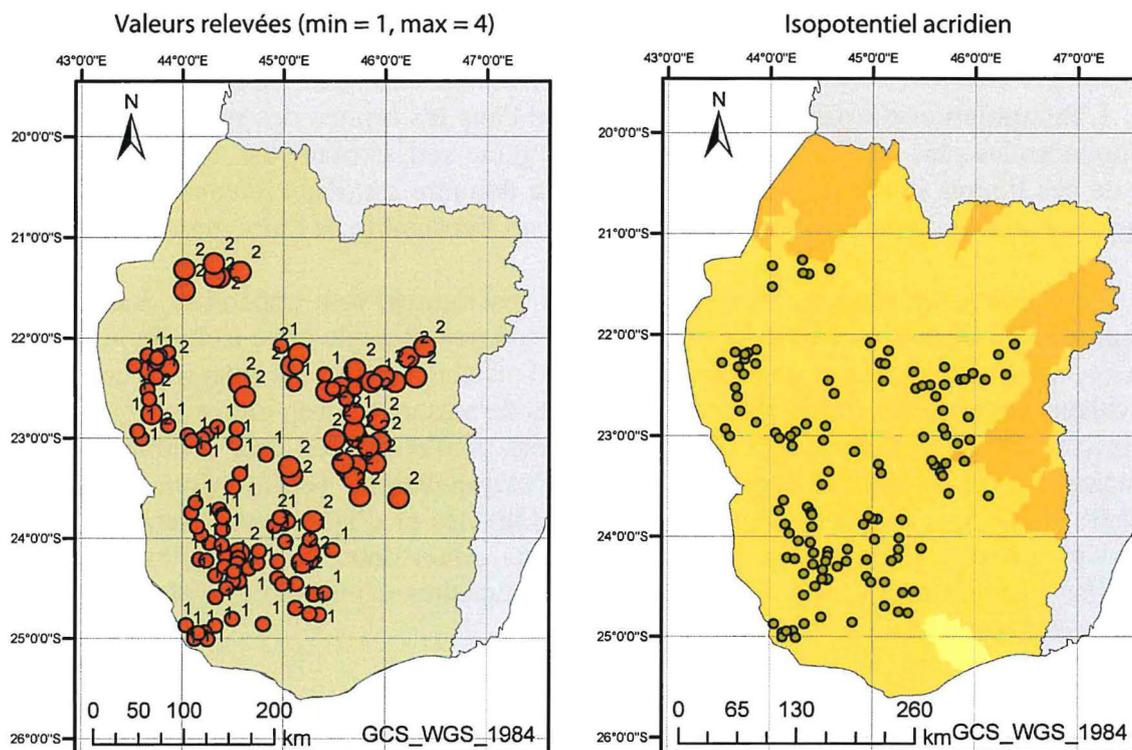


Figure 26 : Cartes des valeurs de potentiel acridien relevées, des isopotentiels acridiens, et de l'incertitude associée à l'interpolation pour le mois de mars 2005

L'information acridienne pour le mois de septembre 2006



Note : interpolation réalisée par krigeage ordinaire avec modèle variographique gaussien

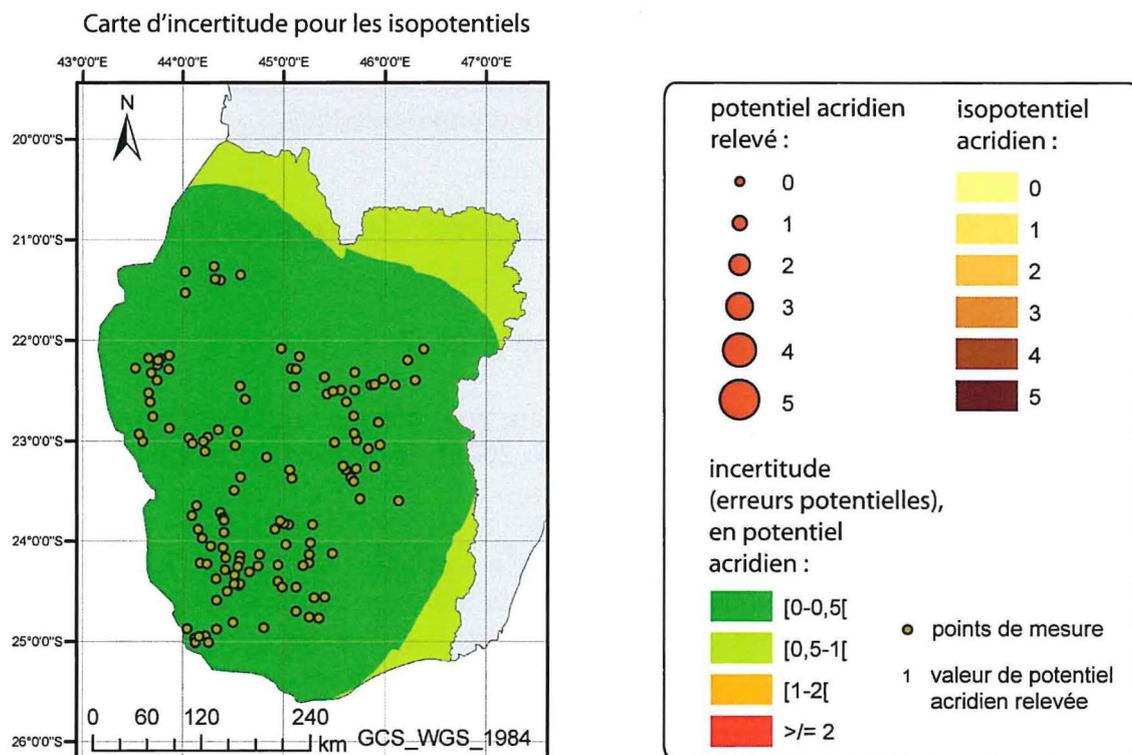


Figure 27 : Cartes des valeurs de potentiel acridien relevées, des isopotentiels acridiens, et de l'incertitude associée à l'interpolation pour le mois de septembre 2006

3.1.2.3. Qualité de l'extrapolation : la remise en cause des performances de l'interpolation

Les **figures 22 à 27** qui représentent les surfaces produites avec les paramétrages sélectionnés mettent en lumière un problème d'importance : il s'agit de l'allure des cartes dans les zones extrapolées.

L'interpolation est par définition cantonnée dans les limites des points de mesure aux coordonnées les plus extrêmes (extrême nord, extrême sud, extrême est, extrême ouest). Au-delà de ces limites il s'agit d'extrapolation. Cette dernière est, dans le contexte des travaux, obligatoire pour pouvoir disposer d'informations sur l'ensemble de l'aire grégarigène.

Les surfaces produites, comme l'illustrent les figures, font apparaître dans les zones extrapolées des figures en « marche d'escalier » (voir par exemple carte isohyète juillet 2002). Le krigeage n'est pas censé produire ce genre d'affichage puisqu'il interpole normalement une valeur moyenne dès que la distance aux points de mesure est trop importante par rapport à la structure de dépendance spatiale des données modélisée, et ceci semble refléter un problème au sein du logiciel dans la gestion de l'extrapolation¹⁸ (Bailly, Com. Pers.). Il n'en demeure pas moins que cette allure des cartes isohyètes et d'isopotential acridien peut être considérée comme inacceptable pour le SIG. Ceci remet donc en cause l'exploitation des méthodes géostatistiques pour la production des couches d'information pluviométrique et acridienne au sein du SIG.

Il faut par contre mettre en valeur que des relevés de terrain situés à la périphérie de l'aire grégarigène permettraient de traiter ce problème. Par ailleurs, les cartes d'incertitude fournies par ces interpolations (avec les paramétrages identifiés) peuvent malgré tout remplir une fonction indicative quant à la qualité des couches d'information utilisées pour établir le diagnostic, si l'on axe leur interprétation moins sur les valeurs que sur les ordres de grandeur de l'incertitude. Pour cette raison elles sont tout de même exploitées au sein de l'outil « Qualité Diagnostic » proposé. Les cartes d'incertitude ont également été exploitées pour définir le réseau minimal de collecte de l'information pluviométrique.

3.2. Définition d'un réseau minimal pour la collecte de l'information pluviométrique

Les graphiques évoqués dans cette partie sont présentés en **Annexe 5**.

Les **graphiques 22 à 25** mettent en relation, pour chaque jeu de données testé (mars 2005, juillet 2002, décembre 2006, et novembre 2006), la surface de chaque polygone de Thiessen et l'incertitude moyenne sur le polygone.

Ils permettent de mettre en évidence qu'à l'échelle de chaque jeu de données l'incertitude est directement corrélée à la densité du maillage du territoire par les points de mesure. Grâce à ces graphiques et à cette relation entre surfaces des polygones de Thiessen et incertitude, il apparaît possible de dégager la surface maximale (et donc le nombre de points

¹⁸ Il ne s'agit pas d'un problème dans le réglage de la portée (*range*). La portée est calculée automatiquement par le logiciel. Elle peut aussi être fixée manuellement mais ceci affecte la forme prise par le modèle variographique et en conséquence les performances des résultats de l'interpolation. Le réglage manuel de la portée ne permet pas non plus d'empêcher la survenue de « marches d'escalier ».

de mesure) pour ne pas dépasser les seuils de 25mm (seuil optimal) et 50mm (seuil minimal) précédemment évoqués.

Le **graphique 26** replace l'ensemble des résultats au sein d'une même figure. On y observe en premier lieu qu'un seul jeu de données (juillet 2002) présente une incertitude inférieure à 25mm. Compte tenu du fait que les jeux de données utilisés font partie de ceux présentant les plus grands nombre de relevés pluviométriques (**voir figure 7**) dans la base de données du CNA, il apparaît impossible de définir la quantité de postes pluviométriques nécessaire pour assurer une incertitude inférieure à 25mm sur l'ensemble de l'aire grégarigène. La problématique du réseau optimal de collecte de l'information pluviométrique ne peut donc pas être résolue (tout du moins sans accroître la quantité des informations disponible pour chaque mois au sein de la base de données du CNA).

On observe également sur ce graphique qu'entre les différents jeux de données des surfaces pourtant identiques ne font pas apparaître les mêmes valeurs d'incertitude. Ceci s'explique par le fait que les valeurs de l'incertitude ne sont pas uniquement influencées par la densité du maillage de l'espace par les postes pluviométriques mais également par l'ampleur des valeurs de pluviométrie présentes au sein de chaque jeu de données et par la variabilité de ces valeurs dans l'espace.

Le **graphique 27** témoigne de l'incidence des valeurs de pluviométrie sur les valeurs de l'incertitude. Sur ce graphique on observe également une différence dans les valeurs de l'incertitude entre les mois de mars 2005 et de décembre 2006 alors que ces jeux de données recèlent des valeurs de pluviométrie très similaires. L'examen de la **figure 17** précédemment exposée montre que le mois de décembre 2006 se caractérise par une plus grande variabilité, notamment à petite distance, des valeurs de pluviométrie¹⁹. Cette (plus) forte variabilité locale est prise en compte au sein du krigeage et se traduit par une (plus) forte incertitude quand aux valeurs interpolées.

Ces différents graphiques témoignent ainsi que la problématique de l'incertitude subit l'incidence de plusieurs facteurs. Quoiqu'il en soit, le cas du mois de décembre 2006, en ne présentant sur aucun de ses polygones de Thiessen une incertitude inférieure à 50 mm complique la définition d'une surface maximale pour garantir une incertitude inférieure à 50mm. Néanmoins, si l'on prend en considération que le mois de décembre représente une situation originale dans le cycle annuel des pluies dans le sud malgache, et surtout qu'il s'agit d'une période au sein de laquelle le risque de pullulations dangereuses est moins prégnant²⁰, il est alors possible de déterminer un réseau minimal de collecte de l'information à partir des autres jeux de données (hors décembre 2006).

On constate alors sur le **graphique 28** (qui reprend les mêmes données que le **graphique 26** en limitant l'axe des abscisses à une surface de 5000km² afin de disposer de la lisibilité nécessaire) que des polygones de Thiessen de surface inférieure à 1400 km²

¹⁹ Ceci s'explique par le fait que la zone de convergence intertropicale (ZCIT) se situe à cette époque de l'année au niveau du centre de l'aire grégarigène. Au nord de l'aire grégarigène la saison des pluies est donc installée tandis que le sud se caractérise encore par une situation de saison sèche. De plus, au centre se trouve la zone de turbulence, marquée par des phénomènes orageux et de fortes précipitations très localisées.

²⁰ Car c'est en décembre qu'a lieu la première reproduction du Criquet migrateur, les effectifs commencent alors seulement à augmenter, et ont d'autant moins de risque de grégariser qu'ils sont dispersés sur une vaste surface (l'AMI). La période à plus haut risque de pullulation se situe en janvier, février, et mars sous l'action conjuguée des fortes températures, de l'accélération des cycles de reproduction, et de la concentration des populations au sein de l'Aire de Densation (AD).

permettent de garantir (dans leur espace) des valeurs d'incertitude moyenne inférieures à 50 mm. En conséquence, pour obtenir une incertitude inférieure à 50 mm sur l'ensemble de l'aire grégarigène (surface de 185 647 km²) pour la couche d'information pluviométrique il faudrait pouvoir disposer chaque mois de 133 relevés pluviométriques²¹. Il est particulièrement étonnant de constater qu'il s'agit précisément du nombre de postes pluviométrique susceptible de transmettre des données recensé par le CNA. Il est par contre édifiant de constater en contrepartie qu'il s'agit de près du double du plus grand nombre de données disponible pour un mois entre 2001 et 2007 au sein de la base de données du CNA (voir **figure 6**).

Il est possible d'envisager qu'une telle augmentation des données utilisées pour produire les cartes isohyètes contribuera à faire baisser fortement l'incertitude pour une situation pluviométrique telle que celle illustrée par le jeu de données de décembre 2006. Il est aussi raisonnable de penser que cette densité de relevés pluviométriques peut permettre de faire baisser l'incertitude sur l'ensemble des jeux de données et contribuer à rapprocher l'incertitude du seuil optimal de 25mm.

Il faut par contre bien considérer qu'en dessous de ce nombre minimal, le SIG ne pourra pas remplir ses ambitions de précision quant à la localisation des risques de pullulation et au calcul des surfaces concernées par les différents niveaux de risque.

Il faut également prendre en compte que ce chiffre de 133 postes pluviométriques s'appuie sur l'hypothèse d'un maillage régulier de l'espace, ce qui n'est pas forcément le cas dans la réalité de terrain. La **figure 28** montre ainsi que la délimitation d'aires de 1400km² autour des postes pluviométriques recensés comme susceptibles de transmettre des données ne recouvre pas la totalité de la surface de l'aire grégarigène. Le chiffre de 133 postes pluviométriques doit donc tout de même être augmenté de façon à pouvoir mailler le territoire de façon plus régulière. La **figure 28** permet de délimiter les secteurs dans lesquels ceux-ci devraient être implantés. Néanmoins puisque la localisation des postes pluviométriques dépend de considérations de terrain (zones habitées, accessibilité) il est difficile de déterminer, depuis l'extérieur, où devraient être placés les postes pluviométriques supplémentaires. De même, en l'absence de jeux de données avec un nombre suffisant de relevés pluviométriques, il est difficile de dire si l'évaluation du nombre de postes pluviométriques nécessaire est surévaluée.

²¹ 185647 / 1400 = 132,6

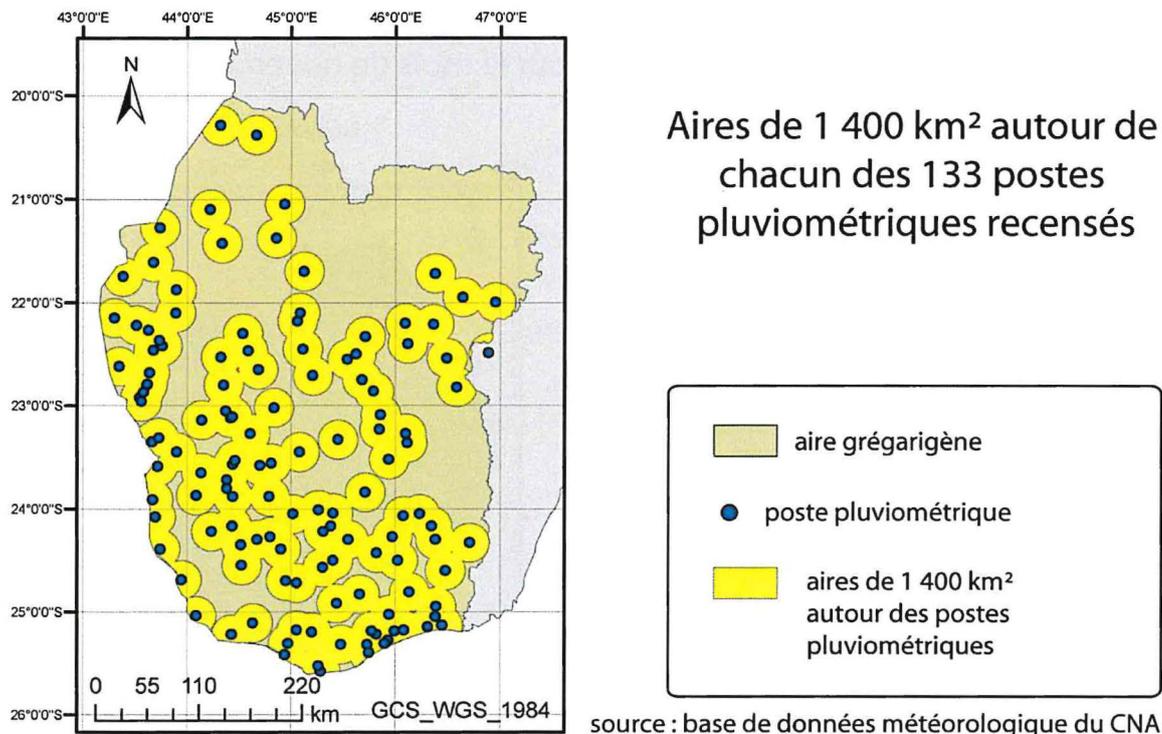


Figure 28 : Carte des surfaces sur lesquelles peut être garantie une incertitude acceptable pour l'interpolation des données pluviométriques si l'ensemble des postes pluviométriques disponibles fournissent des relevés

L'information pluviométrique pour le mois de novembre 2006

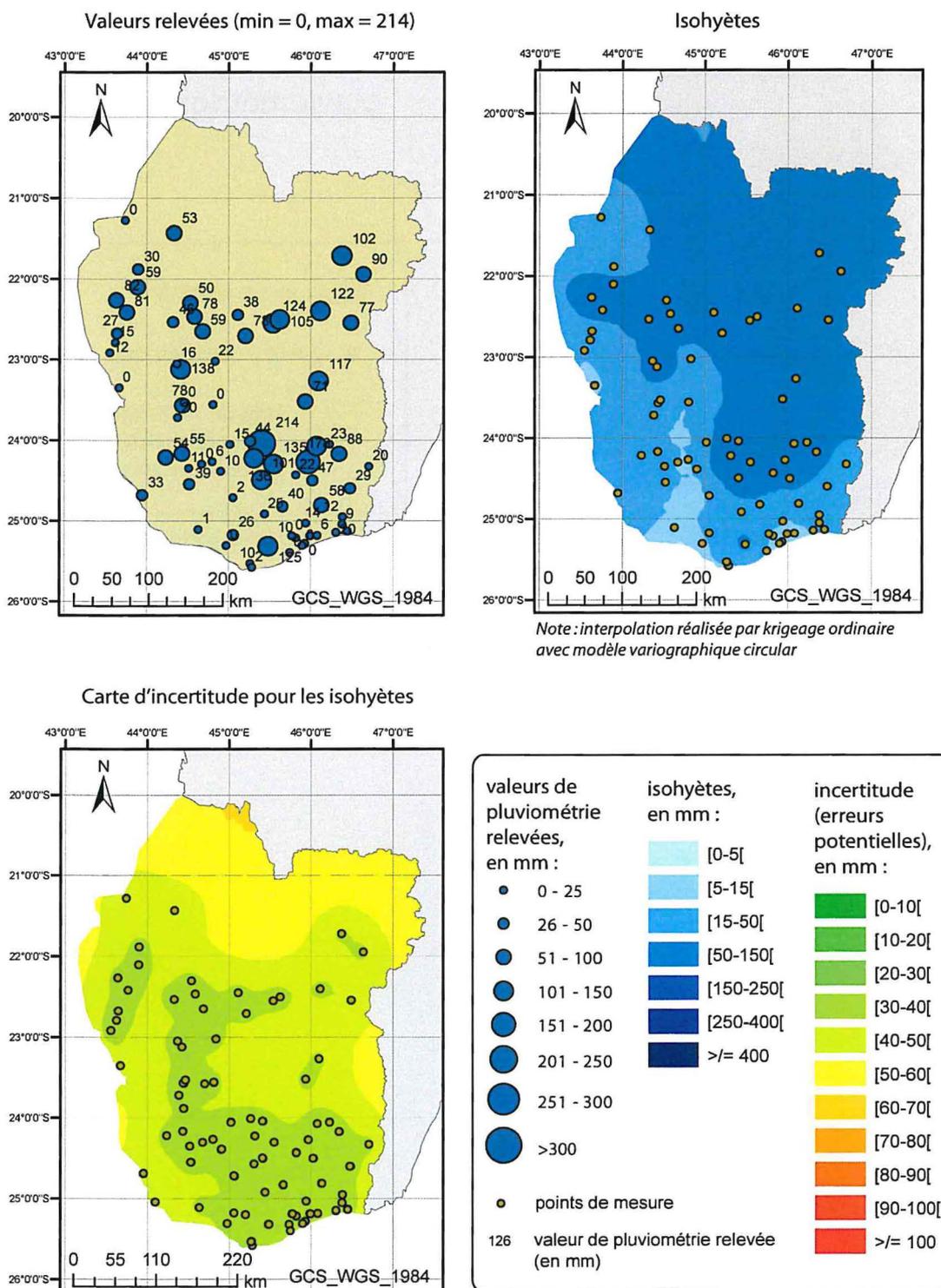


Figure 29 : Cartes des valeurs pluviométriques relevées, des isohyètes, et de l'incertitude associée à l'interpolation pour les données supplémentaires du mois de novembre 2006 utilisées

3.3. La boîte à outils « Qualité Diagnostic »

Un outil visant à renseigner sur la fiabilité du diagnostic de risque établi par le SIG par le biais de l'évaluation de la qualité des couches d'informations pluviométriques et acridiennes a été construit. Il s'appuie sur les réseaux minimaux de collecte de l'information définis et sur la production de cartes d'incertitude via les méthodes géostatistiques. Il permet d'informer sur la fiabilité du diagnostic de risque et sur les zones dans lesquelles des prospections complémentaires doivent être organisées.

Il consiste en une Boîte à outil ESRI (*Toolbox*) renfermant 3 applications :

- l'outil « AuditDonnees »
- l'outil « CartesIncertainite »
- l'outil « FinalisationCartesIncertainite »

L'utilisation se fait dans ArcCatalog. Les outils peuvent être lancés depuis le menu général d'ArcCatalog (arborescence) par double click sur l'icône de l'outil. Un mode d'emploi est disponible et présenté en **Annexe 6**.

L'outil est constitué en plus de la boîte à outils proprement dite de différents dossiers et fichiers (**voir figure 30**). En premier lieu il s'agit des fichiers permanents qui renferment les fichiers utilisés pour produire le décompte des besoins minimaux remplis (voir par exemple pour des opérations de jointure spatiale), pour affecter les paramétrages nécessaires à la production des cartes d'incertitude, ou pour réaliser des opérations de type découpage. Les fichiers permanents sont placés dans le dossier « FichiersPermanents ». Les résultats sont enregistrés dans le dossier « Resultats ». Le mode d'emploi est placé dans le dossier « ModedEmploi ». Il existe enfin un dossier « LayersSymboloSuperposCarteRisque » qui contient des layers stockant une symbologie de référence pour chaque carte d'incertitude (pluviométrique et acridienne) afin de pouvoir superposer celles-ci à la carte de risque.

Les fichiers traités (en entrée) sont les tables créées lors des requêtes au sein des bases de données CNA (météorologique et acridienne) : il s'agit des tables « **Pluvio_demandee** » et « **Pot_acrido_tempo** » qui sont enregistrées à chaque requête dans les bases de données dites « **BD_mto_tempo** » et « **BD_acrido_tempo** ». Leur emplacement n'est pas un problème pour le fonctionnement des outils car la fenêtre de démarrage permet de les localiser.

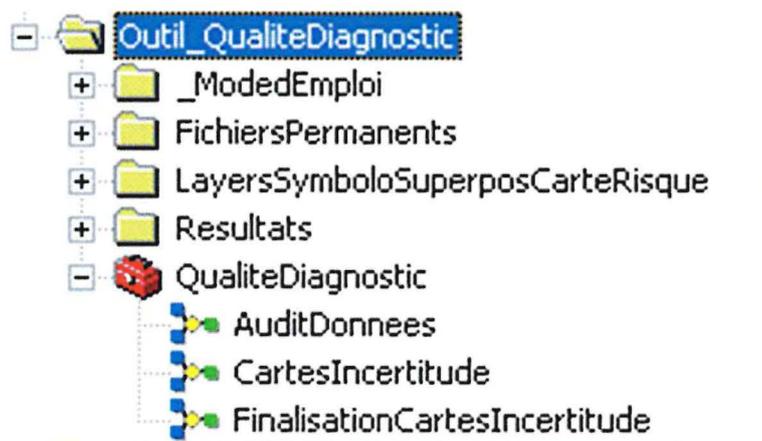


Figure 30 : L'outil QualitéDiagnostic

L'outil « AuditDonnees »

L'outil « AuditDonnees » calcule la quantité des données d'entrée fournies pour la réalisation des couches d'information pluviométrique et acridienne, et compare le résultat aux valeurs de références établies comme besoins minimaux.

Il s'inscrit dans le principe d'Indicateurs Objectivement Vérifiables (IOV). Les résultats sont donnés pour chaque thématique (pluviométrie, prospections acridiennes). Les données pluviométriques sont traitées à l'échelle de l'ensemble de l'aire grégarigène tandis que les données acridiennes sont traitées à l'échelle de chaque secteur acridien.

Les résultats sont présentés sous forme de tables visualisables et exploitables sous ArcCatalog, ArcMap, Microsoft Office Access, Microsoft Office Excel. Elles peuvent être ajoutées à la carte sous ArcMap. Les résultats sont enregistrés dans la Geodatabase (afin de pouvoir être exploités sous Access sans manipulation préalable) « GDB_Resultats_AuditDonnes » au sein du dossier « Resultats ».

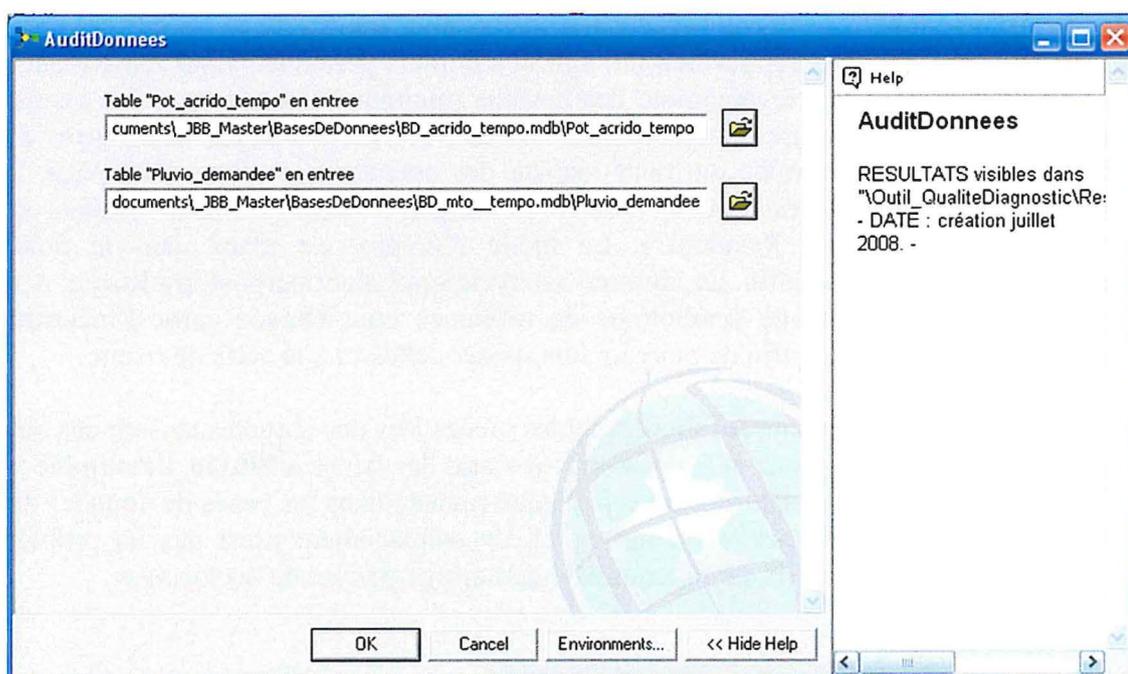


Figure 31 : Fenêtre de lancement de l'application "AuditDonnees"

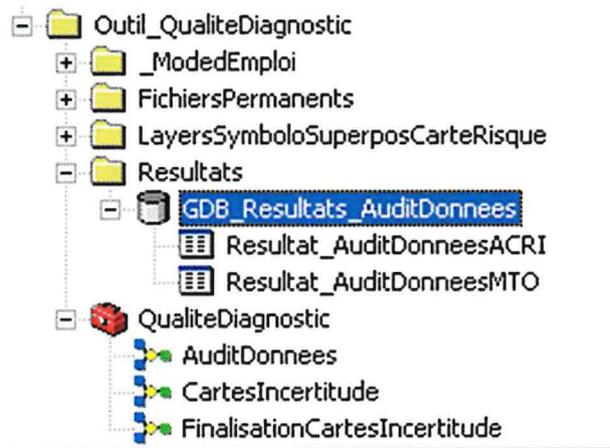


Figure 32 : Stockage des résultats de l'application "AuditDonnees"

OBJECTID *	Annee	Mois	DonneesMTO	Besoin Min	PrctageObtenu
1	2006	12	66	133	50

Figure 33 : Table "Resultat_AuditDonneesMTO"

OBJECTID *	Campagne	Mois		Secteur	StationsDispo	StationsProspe	PrctageProspe	PrctageMII 12
1	2006-2007	12	total pour AIRE GREGARIGENE		423	105	25	
2			secteur	1	0	0	0	100
3			secteur	2	23	4	17	100
4			secteur	3	49	0	0	100
5			secteur	4	70	16	23	100
6			secteur	5	4	0	0	100
7			secteur	6	37	8	22	75
8			secteur	7	103	28	27	75
9			secteur	8	36	10	28	75
10			secteur	9	4	2	49	75
11			secteur	10	75	36	48	75
12			secteur	11	22	1	5	75

Figure 34 : Table "Resultat_AuditDonneesACRI"

L'outil « CartesIncertitude »

L'outil « CartesIncertitude » permet de produire des cartes d'incertitude sans passer par le Geostatistical Wizard. Il exploite le krigeage ordinaire et les modèles variographiques identifiés en **partie 3.1** comme interoperables pour chaque couche d'information.

Les résultats sont enregistrés dans le dossier « Resultats ». Il s'agit de layers du type Geostatistical Analyst Layer (les classes utilisées dans la symbologie peuvent être manipulées).

L'étendue (*extent*) et la symbologie (classes de valeurs et couleurs de représentation) des layers doivent être déterminées manuellement car le Model Builder d'ArcGIS ne permet pas de définir automatiquement l'étendue et la symbologie lors de la création d'un Geostatistical Analyst Layer. Cette étape est importante. Le mode d'emploi explique comment la réaliser.

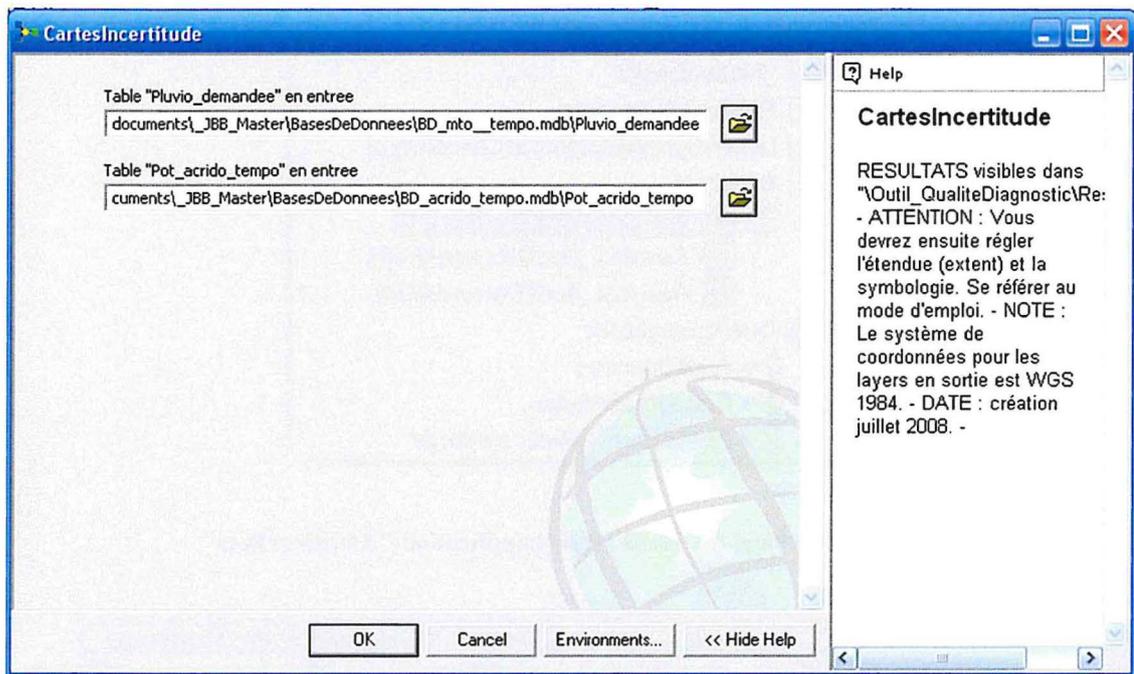


Figure 35 : Fenêtre de lancement de l'application "CartesIncertitude"

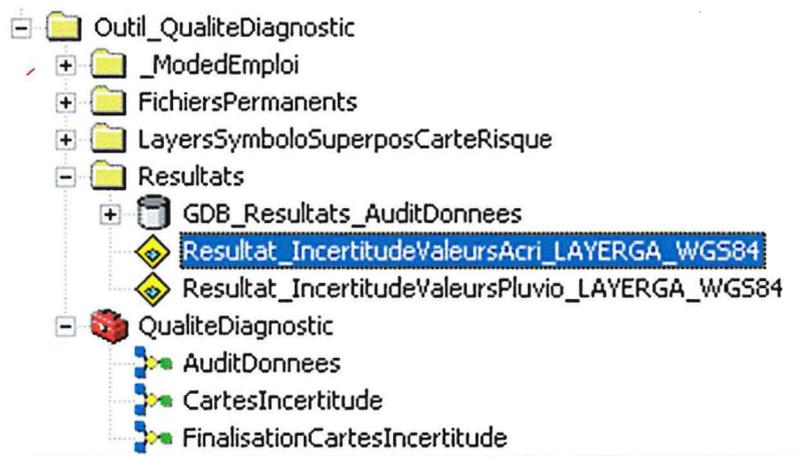


Figure 36 : Stockage des résultats de l'application "CartesIncertitude"

L'outil « FinalisationCartesIncertitude »

L'outil « FinalisationCartesIncertitude » permet de découper le Geostatistical Analyst Layer créé selon les limites de l'aire grégarigène et de l'exporter au format Shapefile.

Un nom par défaut est affecté aux résultats mais peut être déterminé lors du lancement du processus (fenêtre de lancement) (afin par exemple de faire apparaître la date du mois concerné).

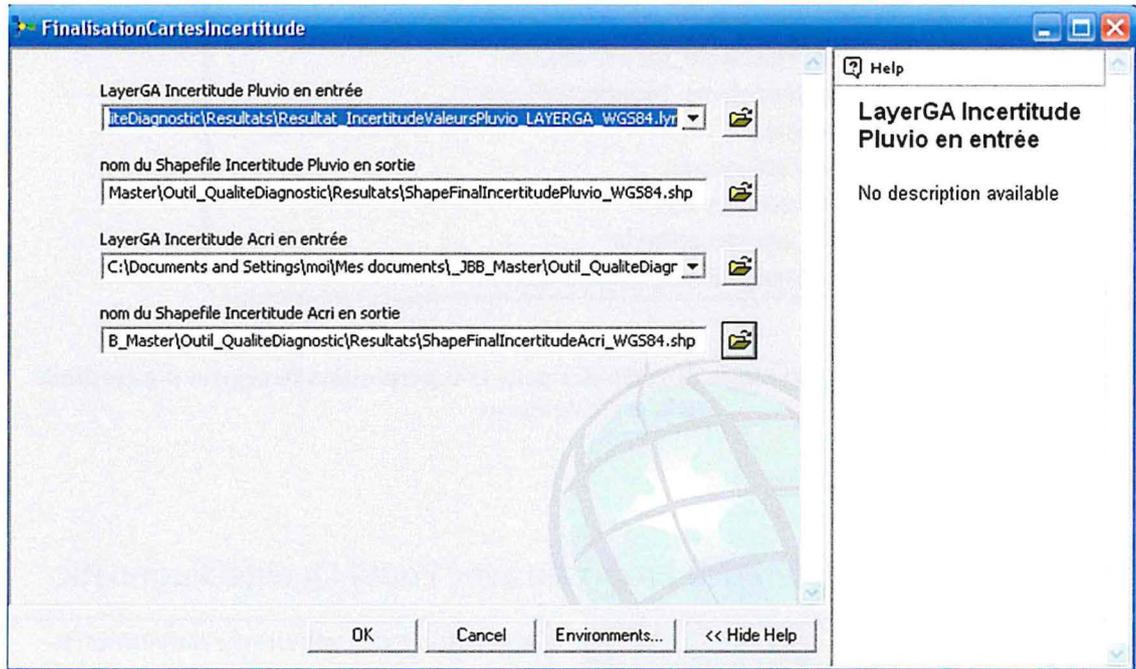


Figure 37 : Fenêtre de lancement de l'application "FinalisationCartesIncertitude"

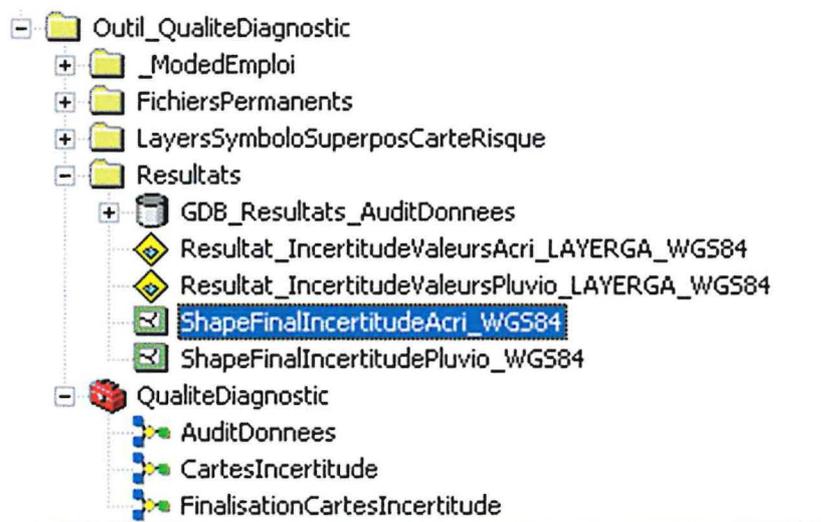


Figure 38 : Stockage des résultats de l'application "FinalisationCartesIncertitude"

Par ailleurs, une symbologie de référence (pour chaque carte de risque, acridienne et pluviométrique) pour pouvoir superposer les cartes d'incertitude créées (Shapefile) à la carte de risque est proposée et disponible dans le dossier « LayersSymboloSuperposCarteRisque » (voir figure 40).

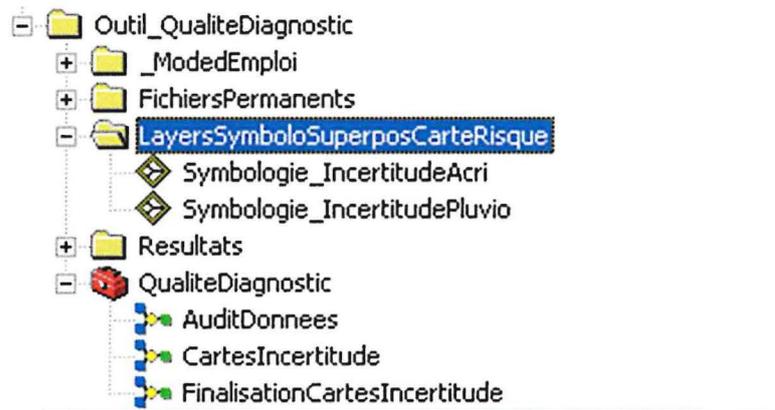


Figure 39 : Stockage de la symbologie de référence pour la superposition des cartes d'incertitude à la carte de risque

Symbologie de référence proposée avec l'outil QualitéDiagnostic

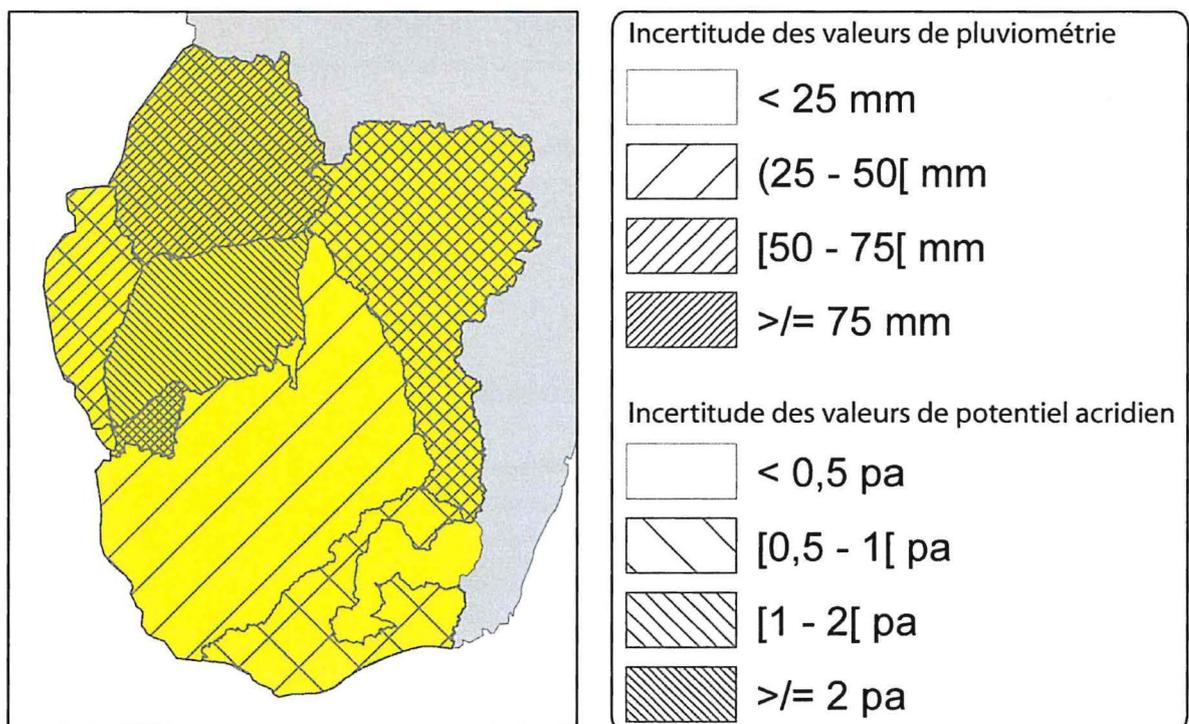


Figure 40 : Symbologie de référence pour la superposition des cartes d'incertitude à la carte de risque

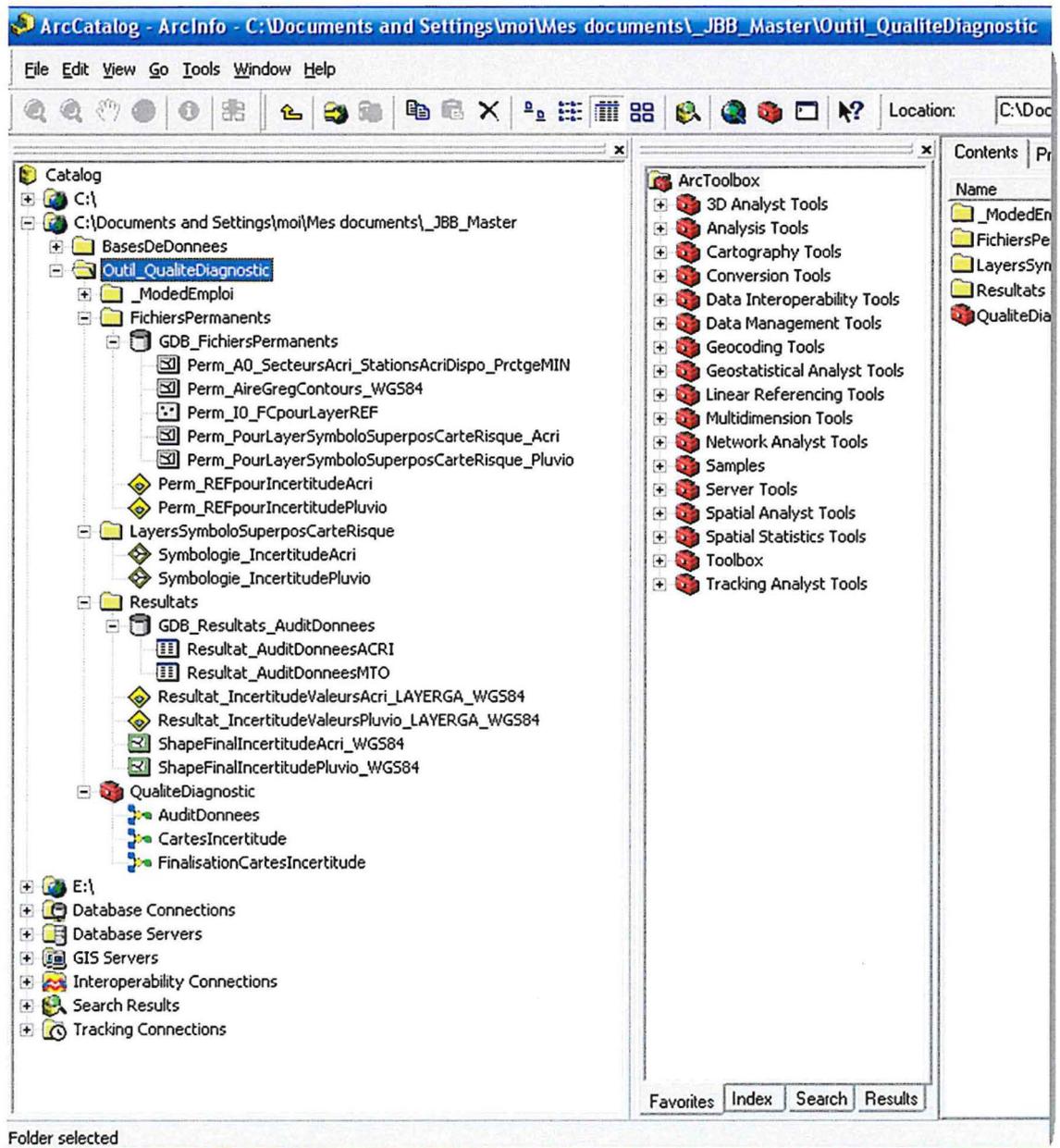


Figure 41 : L'outil QualitéDiagnostic dans l'arborescence ArcCatalog

Conclusion

Le SIG Criquet migrateur vise à définir mensuellement des niveaux de risque de pullulations. Il a pour objectif non seulement de localiser ces risques mais aussi de calculer les surfaces concernées afin de planifier les opérations et les moyens nécessaires. Le diagnostic est établi en croisant 3 couches d'information dont deux sont acquises par interpolation de données ponctuelles. La fiabilité de ces couches et subséquemment celles des surfaces identifiées à risque dépend largement de la quantité d'information en provenance du terrain.

Afin de pouvoir replacer le diagnostic établi dans un contexte de confiance dans les résultats, les méthodes d'interpolation géostatistiques représentent un outil utile car elles permettent d'obtenir une estimation de l'incertitude associée à l'interpolation. Elles produisent des interpolations aussi précises, et parfois plus précises, que la méthode de l'inverse de la distance actuellement utilisée. Leur manipulation est cependant complexe, tout particulièrement concernant l'identification des paramétrages optimaux. Dans l'objectif de simplifier la problématique opérationnelle, certains paramétrages s'avèrent tout de même suffisamment interopérables pour pouvoir être systématisés tout en conservant des performances satisfaisantes. Il s'agit des modèles variographiques « *circular* » pour les données pluviométriques et « *gaussian* » pour les données acridiennes exploités chacun avec le krigeage ordinaire.

L'exploitation de ces méthodes d'interpolation est néanmoins compromise par une mauvaise gestion de l'extrapolation, semble-t-il en relation avec le logiciel utilisé. L'allure des surfaces produites dans les secteurs extrapolés peut rendre les cartes produites inexploitable. En l'état du dispositif de collecte de l'information sur le terrain l'extrapolation est pourtant indispensable pour pouvoir produire un diagnostic sur l'ensemble de l'aire grégarigène. Ce problème peut interdire d'exploiter les méthodes géostatistiques pour produire les cartes isohyètes et d'isopotential acridien utilisées pour établir le diagnostic de risque

Compte tenu de l'utilité de disposer d'une estimation de l'incertitude associée aux interpolations, les cartes d'incertitude réalisées grâce aux paramétrages identifiés comme interopérables apparaissent tout de même devoir être exploitées afin de renseigner sur les ordres de grandeur de l'incertitude et sur la précision du diagnostic. Ces cartes d'incertitude mettent en valeur sur de nombreux jeux de données les très fortes imprécisions pouvant être associées au diagnostic. Si bien entendu le SIG permet et permettra de connaître la situation générale sur l'aire grégarigène, ses ambitions concernant la précision dans la localisation des risques de pullulations et le calcul des surfaces concernées par les différents niveaux de risque peuvent suivant les mois s'avérer très fortement remises en cause.

Il faut remarquer que l'incertitude est plus grande pour les données pluviométriques que pour les données acridiennes. L'ampleur de cette incertitude découle des caractéristiques de la pluviosité dans le sud malgache qui, suivant l'époque de l'année, peut receler une très grande disparité à très petite distance. Elle découle également très clairement du faible nombre de relevés pluviométriques disponible chaque mois pour une aire grégarigène de plus de 185 000

km² (AGT comprise) : entre 2001 et 2007 75% des données mensuelles ne dépassent pas 46 relevés, et sur cette même période le maximum de relevés enregistrés mensuellement s'élève seulement à 76.

En comparant l'incertitude sur les cartes isohyètes et la densité du maillage du territoire par les pluviomètres de terrain ayant transmis les données utilisées (méthodologie exploitant les polygones de Thiessen) il est possible de déterminer un réseau pluviométrique minimal permettant de garantir une incertitude acceptable (inférieure à 50mm). Ce réseau minimal fait appel à au moins 133 postes pluviométriques (dans l'hypothèse théorique d'une répartition homogène des pluviomètres sur l'aire grégorigène), ce qui correspond certes peu ou prou à l'ensemble des postes pluviométriques susceptibles de transmettre des données recensés par le Centre National Anti-acridien malgache mais ce qui représente également près du double du maximum de données mensuelles enregistrées entre 2001 et 2007. En l'absence de jeux de données présentant un plus grand nombre de données il est impossible de savoir si l'ampleur du réseau nécessaire identifié est pessimiste ou même optimiste. Il est par contre certain que le nombre de relevés actuellement disponible n'est pas suffisant pour permettre au SIG de rentrer dans ses objectifs en termes de précision de localisation des risques et de calcul de surfaces. Il faut souligner que les classes de valeurs recherchées pour la pluviométrie sont particulièrement fines (la Plage Optimale Pluviométrique est comprise entre 50 et 150mm de pluie) et que cette finesse ne simplifie pas les choses mais que le dispositif de terrain est condamné à s'adapter à cette exigence imposée par la bio-écologie du ravageur.

Afin de disposer, lors de la production des cartes de risque, d'une information sur la fiabilité des couches d'information acridiennes et pluviométriques utilisées, la boîte à outil QualitéDiagnostic proposée permet de comparer la quantité de données de terrain utilisées avec les besoins minimaux nécessaires pour cantonner l'incertitude à un niveau acceptable. Elle permet également de produire des cartes d'incertitude sans passer par la boîte de dialogue du Geostatistical Wizard, et d'intégrer l'analyse de la fiabilité des couches d'information dynamiques au diagnostic de risque établi en fournissant une symbologie permettant de superposer cartes d'incertitude et carte de risque. Cet outil construit via le Model Builder d'ArcGIS s'appuie sur le principe d'indicateurs objectivement vérifiables (IOV) ainsi que sur la capacité des méthodes géostatistiques à estimer l'incertitude associée aux interpolations. Il réalise ses analyses à partir des bases de données du CNA et exploite les réseaux minimaux de collecte de l'information de terrain déterminés lors des travaux de ce stage ainsi que les paramétrages géostatistiques identifiés comme interopérables dans le contexte du sud malgache lors de ces mêmes travaux.

Pour finir, il faut mettre en valeur le fait que la géomatique représente une technologie de traitement de l'information et qu'en tant que telle l'exploitation de ses possibilités techniques repose sur des données tangibles, que celles-ci soient acquises par photo-interprétation, traitement d'images satellites, ou relevés de terrain. En conséquence le SIG Criquet migrateur ambitionné ne peut reposer que sur un dispositif de collecte de l'information sur le terrain efficient. Seuls les relevés pluviométriques et acridologiques lui permettront de remplir sa fonction et d'assurer son rôle d'outil d'aide à la décision. Ceci consacre une réalité fondamentale, à savoir que la gestion des pullulations acridiennes demeure, avant tout autre chose, une problématique de terrain.

Références bibliographiques

- Andriamaroahina T.**, 2005. *Création d'un outil (SIG) pour le suivi et l'évaluation de la situation acridienne du Criquet migrateur malgache, Locusta migratoria capito (Saussure, 1884) dans une région pilote, la zone de Ejeda (Madagascar)*. Mémoire de master, ENGREF/AGRO/IGN/INA-PG, Montpellier, Paris. 41 p.
- Andrianasolo Ravoavy J.**, 1979. *Relations entre la climatologie et les pullulations d'insectes phytophages dans le Sud-Ouest de Madagascar*. Thèse de doctorat d'Etat. Université Paris VI Sorbonne. 242 p.
- Anonyme (FAO)**, 1973. *Projet de Recherches sur le Criquet migrateur malgache, PNUD/FAO MAG/70/523 : Rapport terminal, juillet 1973*. FAO, Rome. 65 p.
- Baillargeon S.**, 2005. *Le krigeage : revue de la théorie et application à l'interpolation spatiale de données de précipitations*. Université de Laval, Québec. 137 p.
- Baillargeon S., Pouliot J., Rivest L. P., Fortin V., Fitzback J.**, 2004. *Interpolation statistique multivariable de données de précipitations dans un cadre de modélisation hydrologique*. Colloque national 2004 de l'Association canadienne des sciences géomatiques (ACSG-CIG). 12 p.
- Balança G., De Visscher M.-N.**, 1992. *Glossaire des termes élémentaires d'acridologie et de lutte antiacridienne en Afrique sahélienne*. OCLALAV / GTZ / CIRAD-Prifas, Montpellier, France. 157 p.
- Battistini R. (Ed. sc.)**, 1971. *Atlas de Madagascar*. BDPA, Tananarive. 296 p.
- Cardenas G.**, 2004. *Utilisation du module « Geostatistical Analyst » d'ARCVIEW dans le cadre de la qualité de l'air*. Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air. 91 p.
- Courault D.**, 2002. *Rapport tâche 6 programme PFI (Production Fruitière Intégrée) : spatialisation*. Séminaire PFI, Montpellier. 13 p.
- Cressie N.**, 1993. *Statistics for Spatial Data*. Wiley, New York. 900 p.
- Darnhofer T. O., Launois M.**, 1974. *L'optimum pluviométrique du Criquet migrateur malgache, principe et application. Etude globale de l'influence de la répartition spatio-temporelle des pluies sur les populations du criquet migrateur à Madagascar*. FAO, Rome. 88 p.
- Donque G.**, 1975. *Contribution géographique à l'étude du climat de Madagascar*. Nouvelle Imprimerie des Arts Graphiques : Tananarive. 485 p.
- Duranton J.-F.**, 2001. Chronologie acridienne (1996 - 1999). p. 169-181. In Zehrer W. (Ed.). *Lutte antiacridienne à Madagascar. Tome 1. Biologie et écologie*. Projet DPV/GTZ Promotion de la Protection Intégrée des Cultures et des Denrées Stockées à Madagascar, Tananarive. 410 p.

- Duranton J.-F.**, 2002. *Conception d'un outil d'aide à la décision en matière de lutte anti-acridienne à Madagascar. Avancement des travaux en fin décembre 2001*. PCLA, Centre National Antiacridien / CIRAD-AMIS-PPC-Prifas, Tuléar, Madagascar) / Montpellier, France. 72 p.
- Duranton J.-F., Launois M., Launois-Luong M. H., Lecoq M.**, 1979. Les voies privilégiées de déplacement du Criquet migrateur malgache en phase solitaire. *Bull. Ecol.*, **10**(2) : p 107- 123
- Duranton J.-F., Launois M., Launois-Luong M. H., Lecoq M.**, 1982. *Manuel de prospection acridienne en zone tropicale sèche. I- De la théorie...II...à la pratique*. Ministère des Relations extérieures - Coopération et Développement et GERDAT, Paris. 1496 p.
- Franc A., Andriamaroahina T., Duranton J.-F., Lecoq M., Legros Y., Luong-Skovmand M. H., Rabesisoa L. F., Randriamifidimanana H., Solofoniaina H.**, 2004. *La lutte préventive anti-acridienne à Madagascar. Rapport final*. Centre National Antiacridien, Tuléar, Madagascar / CIRAD, Montpellier, France. 140 p.
- Gratton Y.**, 2002, Le Krigeage : la méthode optimale d'interpolation spatiale. *Les articles de l'Institut d'Analyse Géographique.*, 06/2002 . 4 p.
- Launois M.**, 1974. *Influence du facteur pluviométrique sur l'évolution saisonnière du Criquet migrateur en phase solitaire et sur sa grégarisation à Madagascar*. Ministère de la Coopération, Paris. 159 p.
- Lecoq M.**, 1975. *Les déplacements par vol du Criquet migrateur malgache en phase solitaire: leur importance sur la dynamique des populations et la grégarisation*. Ministère de la Coopération, Paris. 272 p.
- Lecoq M.**, 1995. Forecasting systems for migrant pests. III. Locusts and grasshoppers in West Africa and Madagascar. p. 377-395. In: Drake V.A. et Gatehouse A.G. (Eds) *Insect migration : physical factors and physiological mechanisms*. Cambridge University Press, Cambridge, Grande Bretagne.
- Marcotte D.**, 1995. An experimental comparison of ordinary and universal kriging and inverse distance weighting. *Mathematical Geology*, **27**(5) : p 659- 672
- Nikolova N., Vassilev S.**, 2008. *Mapping precipitation variability using different interpolation methods*. Orhid, Macédoine : Balwois, 11p. BALWOIS 2008. Conference on Water Observation and Information System for Decision Support. 3, 2008/05/27-31, Republic of Macedonia.
- Renard F., Comby J.** 2006. Evaluation de techniques d'interpolation spatiale de la pluie en milieu urbain pour une meilleure gestion d'événements extrêmes : le cas du Grand Lyon. *La Houille Blanche*, **6** (2006) : p 73-78
- Zolotarevsky B.-N.**, 1929. Le Criquet migrateur (*Locusta migratoria capito* Sauss.) à Madagascar. *Ann. Epiphyt.*, **15** : p 185- 236

Annexe 1 : Photographies du Criquet migrateur

Larve de stade 5 solitaire



Crédit photo : J-F.Duranton

Larve de stade 5 grégaire



Crédit photo : J-F.Duranton

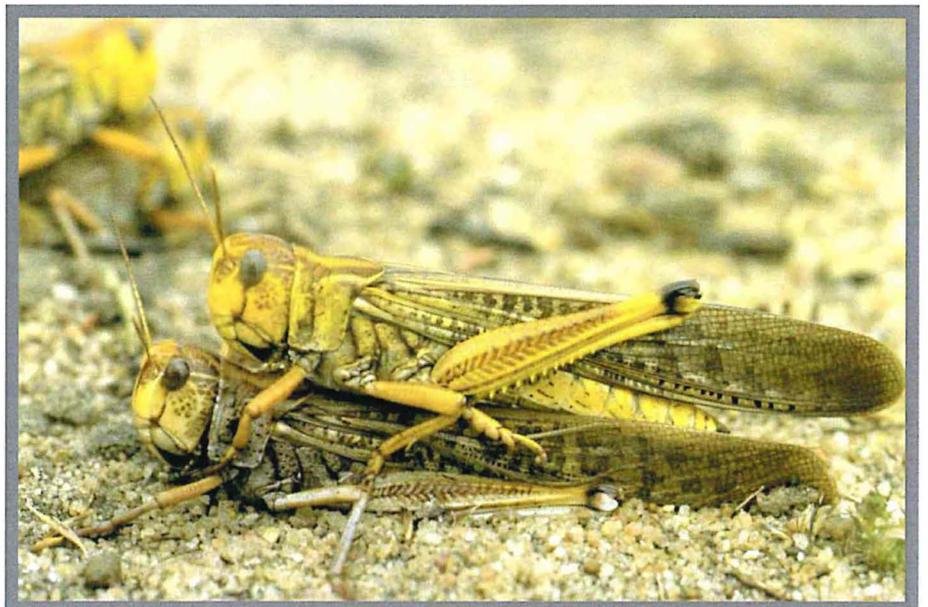
Imagos solitaires

*Crédit photo :
J-F.Duranton*



Imagos grégaires

*Crédit photo :
J-F.Duranton*

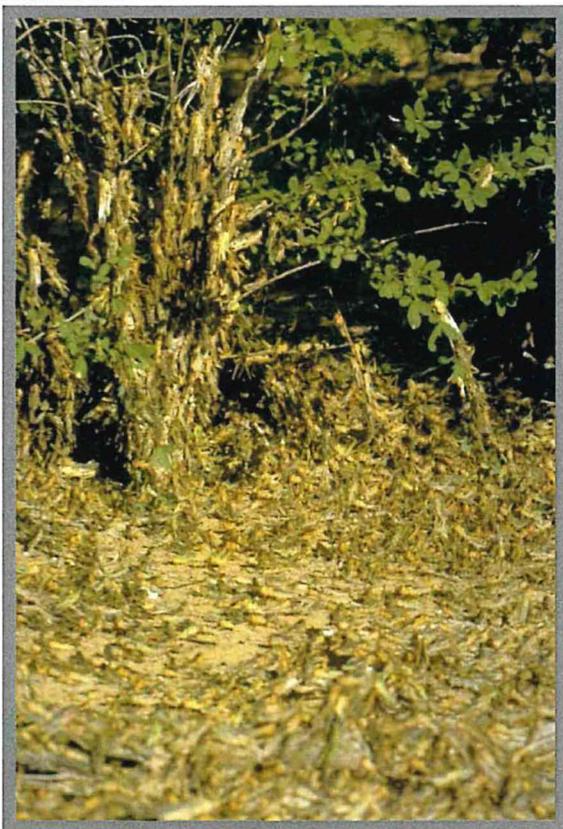


Bande larvaire



Crédit photo : J-F.Duranton

Bande larvaire

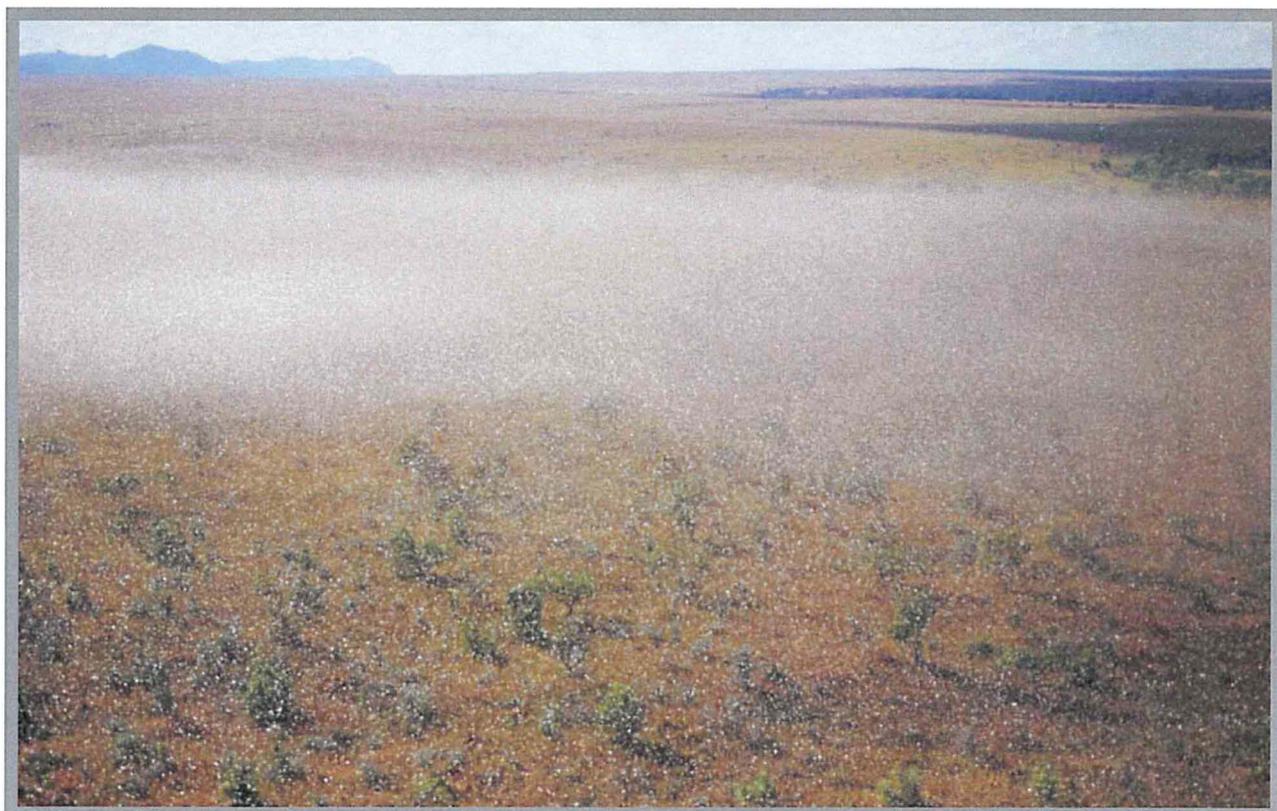


Crédit photo : J-F.Duranton

Essaims



Crédit photo : M.Lecoq



Crédit photo : M.Lecoq



Essaim. Crédit photo : M.Lecocq

ANNEXE 2 : Expérimentation du SIG sur la zone pilote d'Ejeda

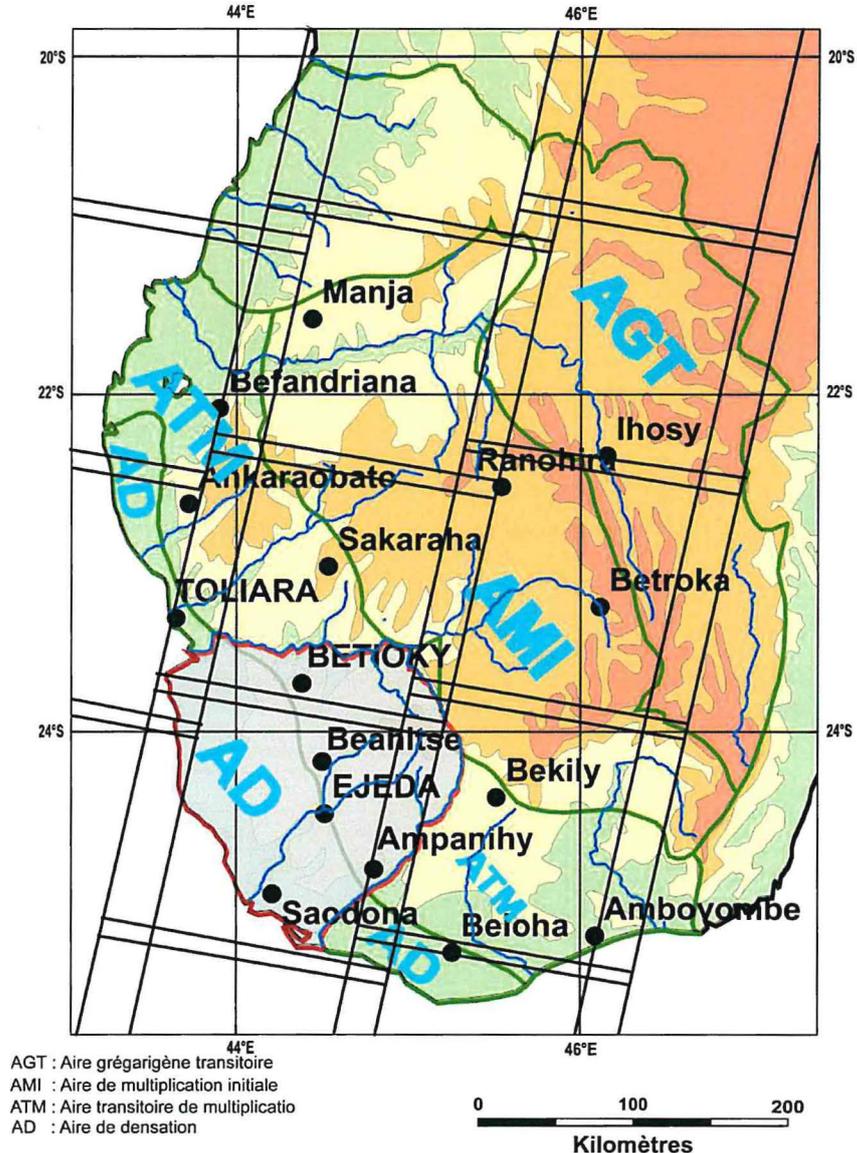


Figure : localisation de la zone pilote d'Ejeda (entourée de rouge sur la carte)
(source : Andriamarohina, 2005)

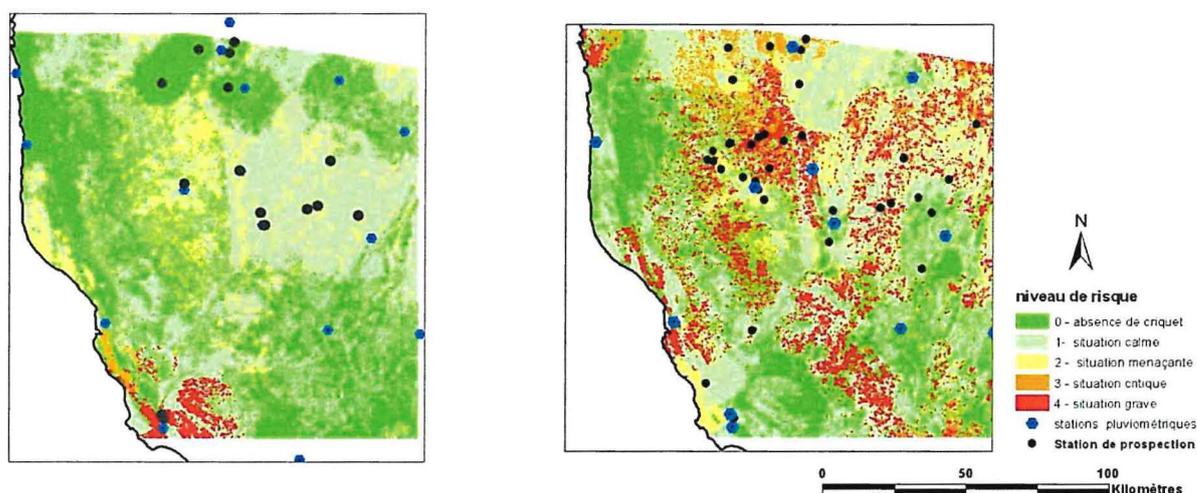


Figure : Carte de risque acridien dans la zone d'Egeda en février 2004 : à gauche en fin décembre 2003 et à droite en février 2004 (Source : Andriamaroahina, 2005)

Tableau : Exemple de tableau planimétrique des surfaces concernées selon le niveau de risque en février 2004 dans la zone pilote d'Egeda (Source : Andriamaroahina, 2005)

Code RN	Région Naturelles	Surface en hectare selon le niveau de risque										Total
		0		1		2		3		4		
		surface	%	surface	%	surface	%	surface	%	surface	%	
I-01	Plaine côtière mahafaly nord	39 032	32,07	52 521	43,15	15 456	12,70	0	0,00	14 704	12,08	121 712
I-02	Plaine côtière mahafaly Sud	6 705	36,01	11 906	63,94	10	0,06	0	0,00	0	0,00	18 622
II-03	Plateau mahafaly nord	27 474	22,47	58 478	47,83	11 733	9,60	21 557	17,63	3 013	2,46	122 255
II-04	Plateau mahafaly centre	182 447	36,01	167 127	32,99	62 639	12,36	24 642	4,86	69 741	13,77	506 596
II-05	Plateau mahafaly sud	71 996	55,32	47 328	36,36	0	0,00	0	0,00	10 825	8,32	130 148
III-06	Basse vallée de la Linta	13 303	42,31	18 103	57,58	34	0,11	0	0,00	0	0,00	31 441
IV-07	Arc interne nord	8 560	12,69	31 328	46,44	8 947	13,26	5 403	8,01	13 224	19,60	67 462
IV-08	Arc Interne sud	38 417	41,57	27 687	29,96	7 188	7,78	293	0,32	18 820	20,37	92 404
V-09	Vallée de la Menarandra	378	6,98	4 253	78,53	2	0,03	0	0,00	783	14,45	5 415
VI-10	Moyenne vallée de la Linta	3 911	32,16	4 007	32,95	2 608	21,44	660	5,43	975	8,02	12 161
VII-11	Cuesta de Sakoa Sakamena	4 573	6,33	46 986	65,06	20 661	28,61	0	0,00	0	0,00	72 220
VIII-12	Sud du Plateau de Betioky	86	0,27	17 606	54,10	7 931	24,37	6 923	21,27	0	0,00	32 546
IX-13	Plateau de Karimbola	12 903	55,03	2 413	10,29	0	0,00	3 850	16,42	4 279	18,25	23 446
X-14	Pénéplaine Bekily-Fotadrevo	183 904	31,09	201 563	34,07	128 402	21,71	7 401	1,25	70 271	11,88	591 542
TOTAL		593 601	2,48	691 306	37,82	265 609	14,53	70 729	3,87	236 626	11,30	1 827 970
Interprétation		Risque nul à faible : 70,30 %		Risque moyen : 14,53		Risque fort : 15,87						

RN : Région Naturelle

ANNEXE 3 : Tutoriel descriptif des menus et fenêtres pour l'exploitation de la barre d'outils Geostatistical Analyst (ArcGIS 9.2)

L'extension Geostatistical Analyst est uniquement disponible en anglais.

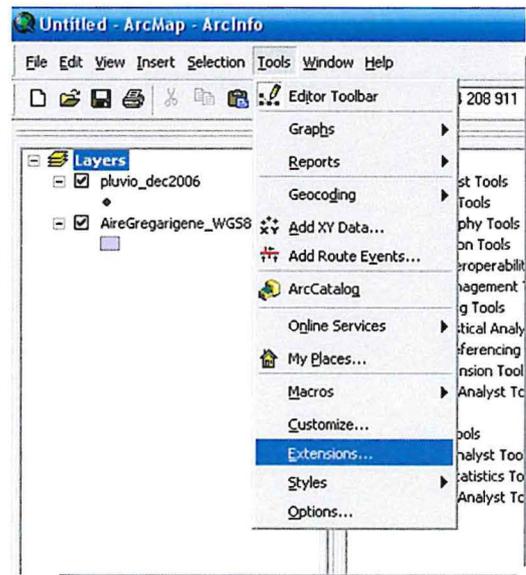
Dans la version 9.2 du logiciel, les fonctionnalités offertes par l'extension Geostatistical Analyst sont accessibles de deux manières :

- la barre d'outils Geostatistical Analyst
- la Toolbox Geostatistical Analyst (ArcToolbox)

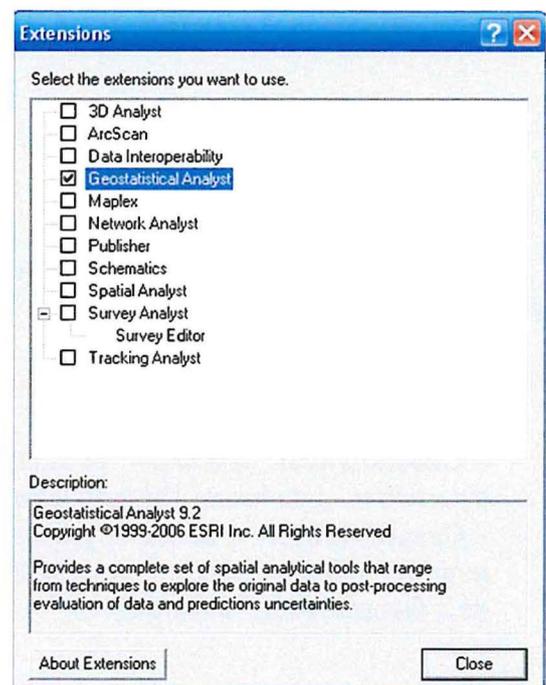
Nous présenterons ici uniquement la barre d'outils Geostatistical Analyst.

1 - Activer l'extension Geostatistical Analyst

Click **Tools/extensions**

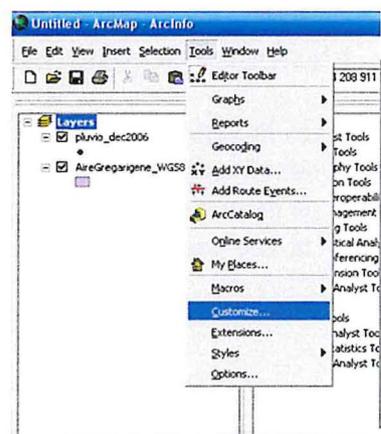


Puis cocher **Geostatistical Analyst**

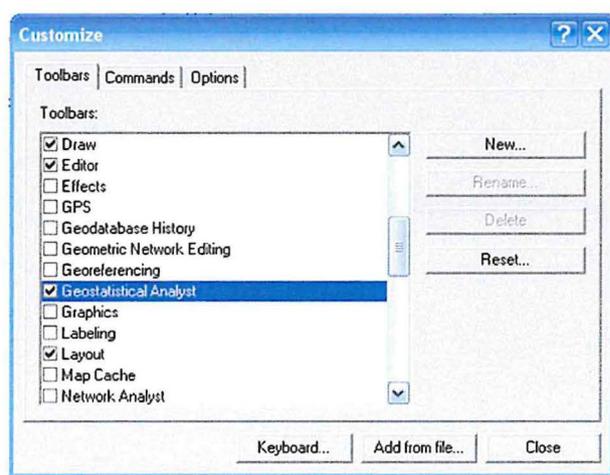


2 - Afficher la barre d'outil Geostatistical Analyst

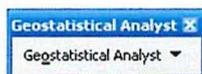
Click Tools/Customize



Puis cocher **Geostatistical Analyst**

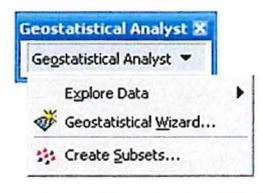


3- La barre d'outils Geostatistical Analyst



La barre d'outils Geostatistical Analyst propose différents menus :

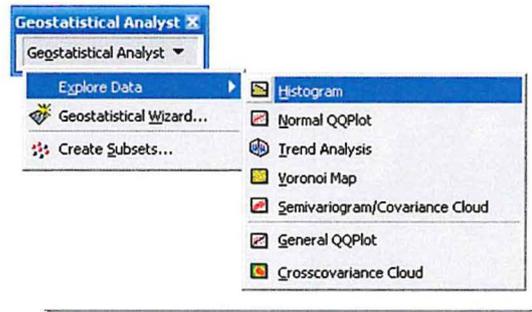
- « **Explore Data** » fournit des outils pour explorer les caractéristiques des données.
- « **Geostatistical Wizard** » permet de fixer les paramètres et de lancer l'interpolation.
- « **Create Subsets** » divise le jeu de données en 2 pour pouvoir procéder au test de validation (au sein de « Geostatistical Wizard »)



4- L'exploration des données : le menu Explore Data

Le menu « Explore Data » fournit différents outils permettant de caractériser les données et ainsi de mieux envisager les paramétrages à effectuer pour une interpolation optimale.

Tous les graphiques réalisés via les outils du menu Explore data peuvent être ajoutés aux cartes en cliquant sur le bouton « **Add to Layout** »

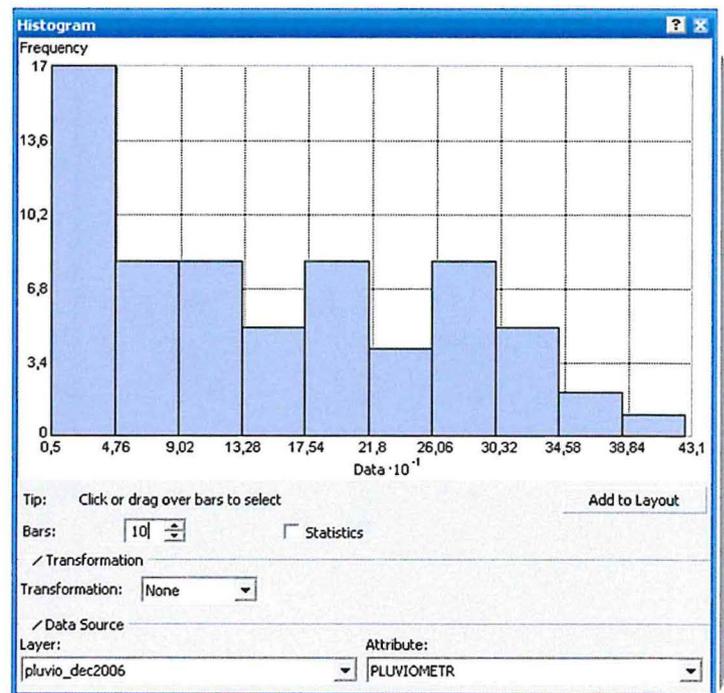
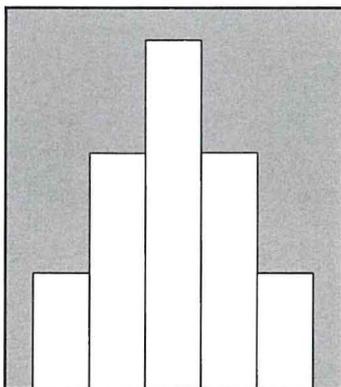


4.1 Histogramme

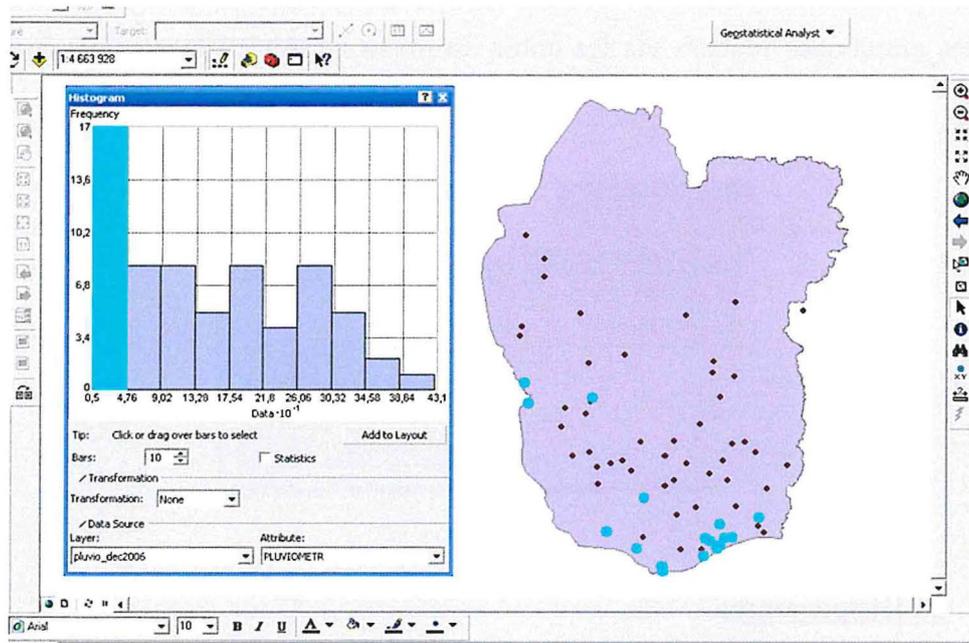
Les interpolations par krigeage donnent les meilleurs résultats lorsque la distribution des valeurs des données relève de la loi normale (distribution symétrique). Néanmoins la conformation à la loi normale n'est pas obligatoire pour pouvoir procéder à l'interpolation. Il est possible de transformer les données pour les rééchelonner sur la modèle d'une distribution normale. L'histogramme permet de rendre compte de la distribution des valeurs en représentant la fréquence de celles-ci au sein du jeu de données.

Le menu déroulant « **Transformation** » permet de tester l'incidence des deux modes de transformation proposés.

forme de l'histogramme
pour une distribution
normale



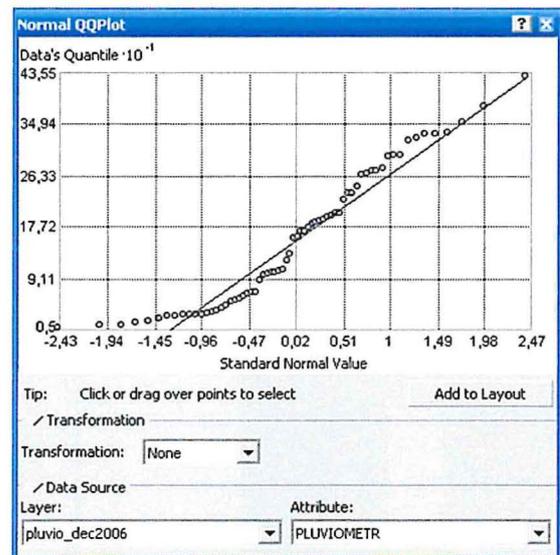
Remarque : il est possible de cliquer sur les barres de l'histogramme, les points de mesure concernés seront alors mis en surbrillance sur la carte (ArcMap). Vice-versa, il est possible de cliquer sur des points de la carte pour mettre en surbrillance leur emplacement sur l'histogramme.



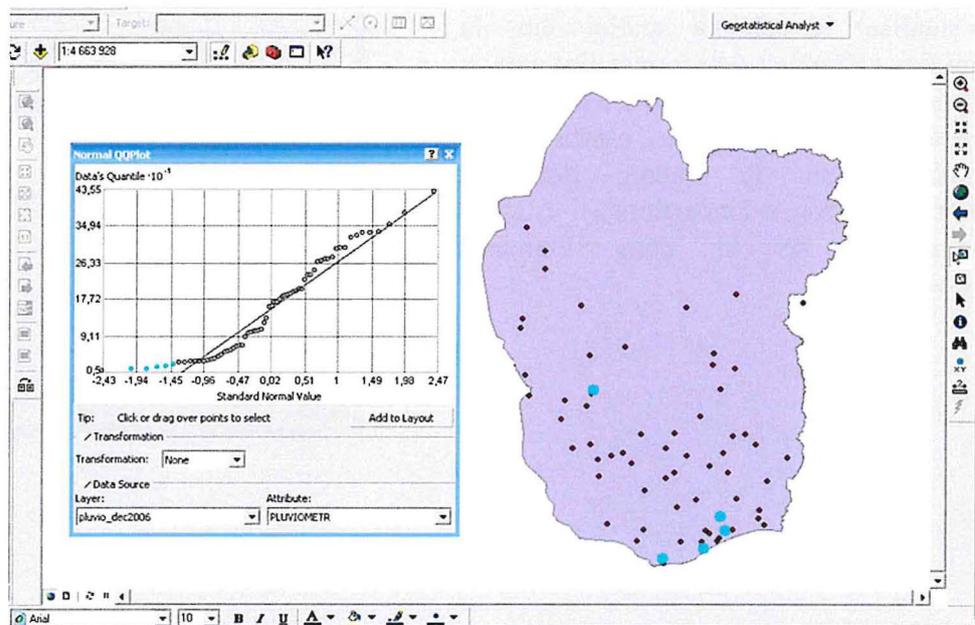
4.2 Normal QQPlot

Le graphique « Normal QQplot » permet de comparer la distribution des valeurs du jeu de données par rapport à une distribution selon la loi normale. La loi normale est représentée par la ligne en pointillé, les données par les points.

Le menu déroulant « Transformation » permet de tester l'incidence des deux modes de transformation proposés.



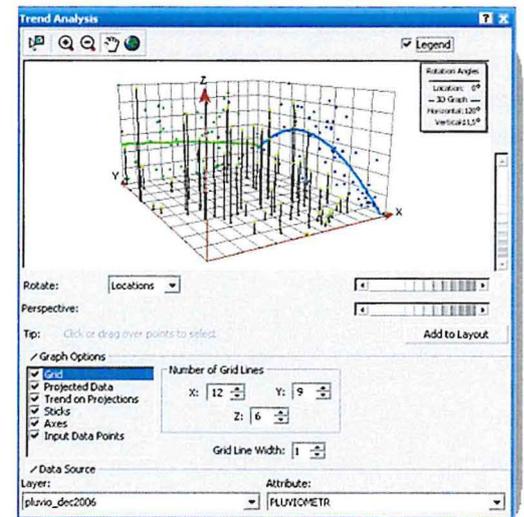
Remarque : il est possible de sélectionner des points sur le graphique afin de visualiser leur emplacement sur la carte et vice-versa.



4.3 Trend Analysis

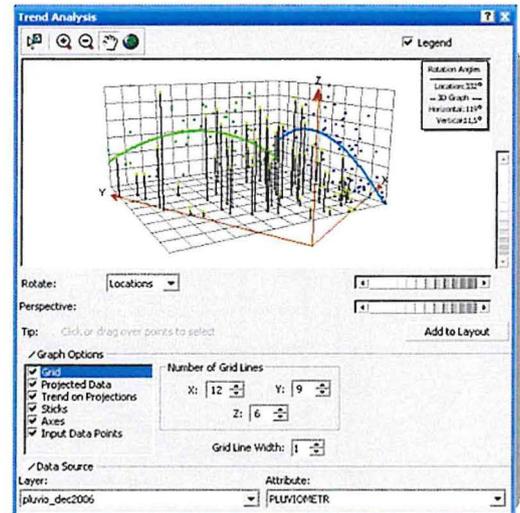
L'outil Trend Analysis permet de détecter la présence d'une dérive (une tendance générale affectant tout le jeu de données).

Chaque barre verticale représentée sur le graphique représente la localisation dans l'espace (plan horizontal) et la valeur de chaque donnée (élévation de la barre). Les points sont ensuite projetés sur 2 plans verticaux représentant les répartitions Est/Ouest et Nord/Sud et une ligne moyenne est tracée sur chaque plan pour représenter l'évolution des valeurs en fonction des coordonnées (ces deux lignes sont représentées en bleu et en vert). Si une dérive est présente dans les données, alors les courbes laisseront apparaître un schéma dans la répartition des valeurs par rapport aux coordonnées : une ligne ascendante ou descendante ou une forme en U (ou U retournée).



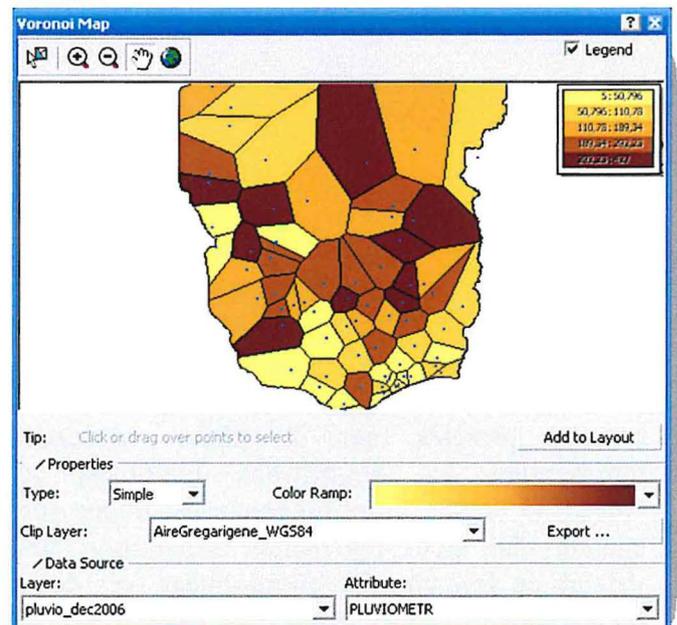
Remarque : il est possible de sélectionner des points sur le graphique afin de visualiser leur emplacement sur la carte et vice-versa.

La dérive n'aura pas forcément une orientation Nord/Sud ou Est/Ouest stricte. Pour mieux visualiser le schéma spatial dans la répartition des valeurs et déterminer l'axe de la dérive (par exemple Nord-Ouest/Sud-Est) il faut utiliser les outils de rotation (en sélectionnant dans le menu déroulant « **Rotation** » l'option « **Locations** »). L'angle de l'orientation se lit dans l'encadré « **Legend** ».

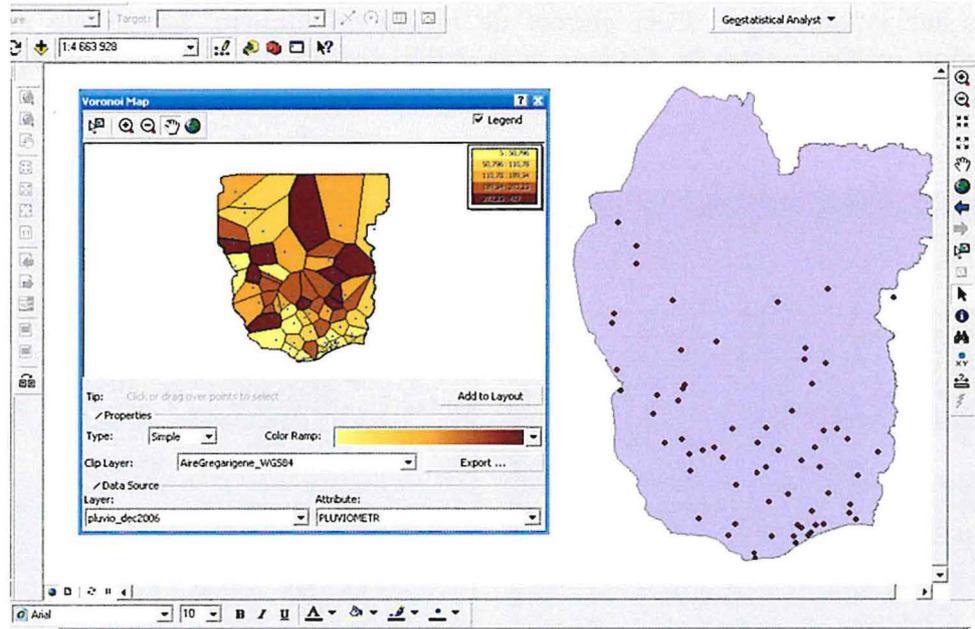


4.4 Voronoï Map

La carte Voronoï (ou carte des polygones de Thiessen) représente les polygones formés lorsque l'on délimite quelles parts de la surface sont les plus proches de chaque point de mesure. Elle permet d'avoir une idée du maillage de l'espace par les points de mesure et de la répartition dans l'espace des valeurs relevées. La carte créée peut être exportée (au format Shapefile, ou Feature Class).



Remarque : cet outil présente une lacune : si l'étendue du polygone utilisé pour déterminer les frontières de la carte (ici Aire Grégarigène) est trop vaste par rapport à la distribution des points de mesure, les secteurs trop éloignés des points de mesure seront rognés.

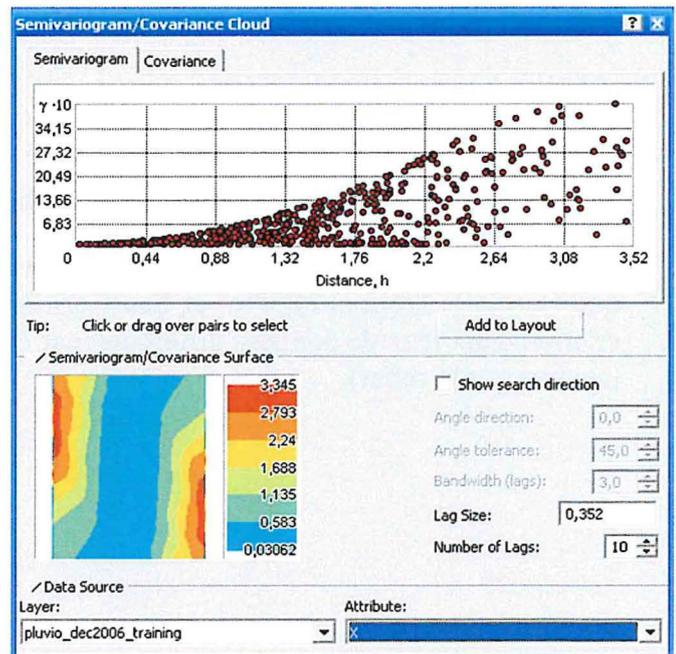


4.5 Semivariogram/Covariance Cloud

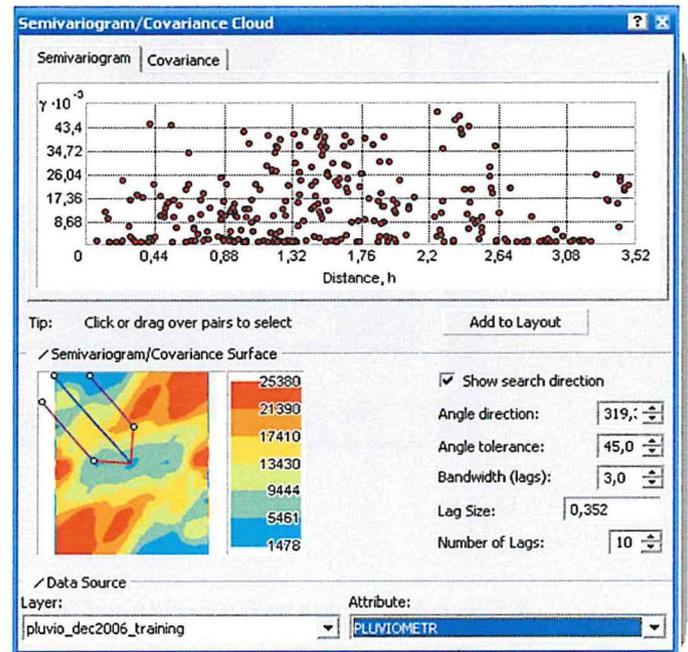
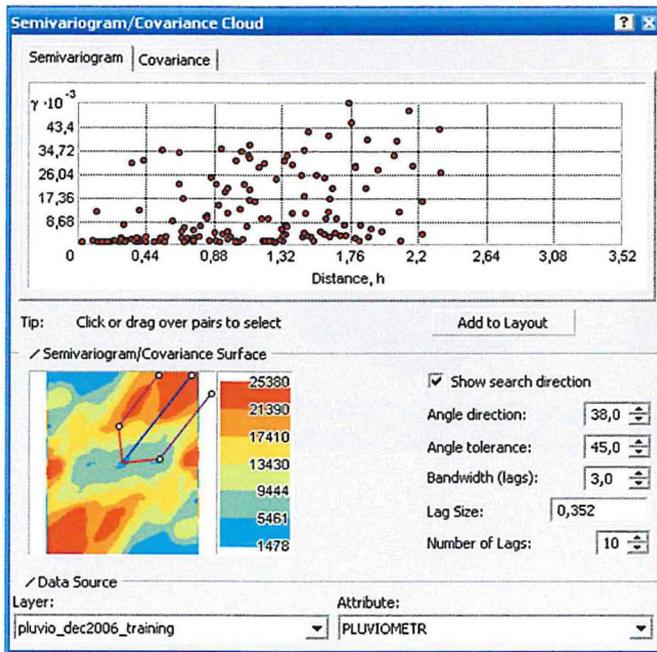
L'outil Semivariogram / Covariance Cloud permet d'évaluer la variabilité dans l'espace des valeurs de la variable et de caractériser ce qui est appelé la structure de dépendance spatiale des données. Il compare la distance et la différence de valeurs entre 2 points. Tous les points sont comparés les uns aux autres et le résultat est placé sur un graphique avec en abscisse la distance entre les points et en ordonnée la différence de valeur. Chaque point sur le graphique représente la comparaison entre une paire de points.

La surface variographique (la carte colorée en bas à gauche) replace ceci dans l'espace.

Remarque : il est possible de mettre en surbrillance sur la carte ou sur le graphique les points pointés sur l'un ou sur l'autre.



L'option « **Search Direction** » permet de déterminer s'il existe une direction privilégiée pour la distribution des valeurs. Ceci fait référence à l'anisotropie. Pour explorer une telle dépendance de la variabilité des valeurs à la direction, il faut cocher l'option « Search Direction » puis manipuler la flèche affichée, ce qui sélectionnera uniquement les couples de points orientés selon la direction indiquée par la flèche et ces points seront les seuls représentés sur la graphique. Ceci permet de mettre en lumière, lorsqu'elle existe, une autocorrelation (relation entre la distance et la différence de valeurs) plus élevée dans une direction que dans une autre.



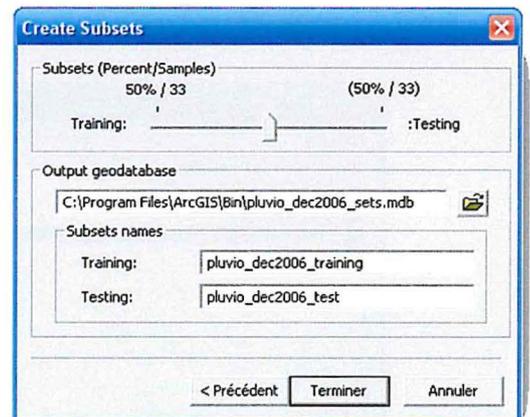
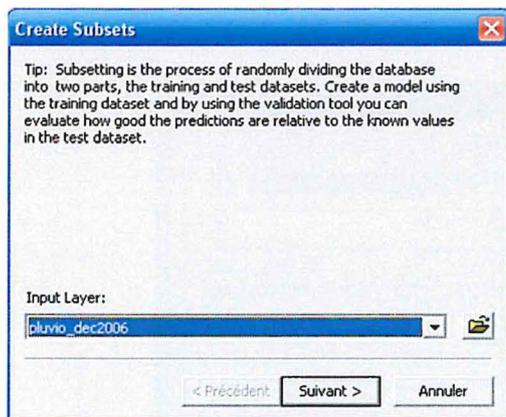
4.6 General QQPlot et Crosscovariance Cloud

Les outils General QQPlot et Crosscovariance Cloud remplissent les mêmes objectifs que les outils Normal QQPlot et Semivariogram/Covariance Cloud mais visent à mettre en relation deux jeux de données différents (par exemple un jeu de données sur la pluviométrie et un autre sur le relief).

5 - Le menu Create Subset



Le menu Create Subset permet de séparer les données en 2 jeux de données afin de procéder à l'interpolation sur un des jeux de données et de vérifier les résultats de cette interpolation grâce aux données contenues dans le second. Ce procédé est appelé **test de validation**. Il est réalisé (si choisi) au sein du menu Geostatistical Wizard. Pour le réaliser il faut d'abord créer les 2 jeux de données grâce au menu Create Subset puis spécifier dans le Geostatistical Wizard le souhait de réaliser un test de validation. Les fenêtres ouvertes avec le menu Create Subset permettent de déterminer la proportion des données du jeu de données en entrée à affecter dans chaque nouveau jeu de données en sortie.



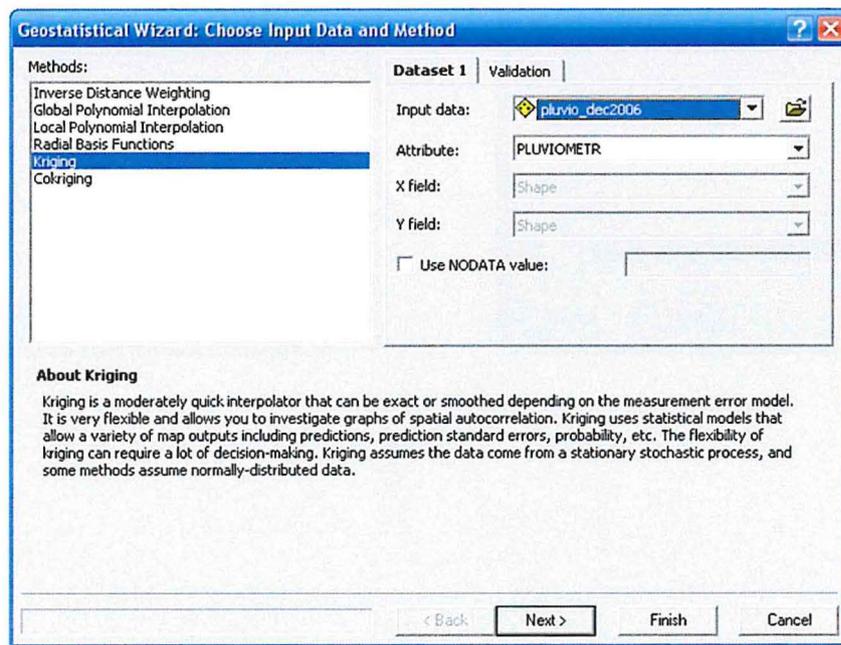
6 - Procéder à l'interpolation : le Geostatistical Wizard

Le Geostatistical Wizard est une boîte de dialogue qui permet de fixer les paramètres qui seront utilisés pour l'interpolation. Le choix des paramètres se fait par une succession de fenêtres. On passe de l'une à l'autre en cliquant sur les boutons « **Next** » ou « **Back** ». Le bouton « **Finish** » lance l'interpolation. Il n'est pas nécessaire de passer toutes les fenêtres pour pouvoir lancer l'interpolation ; pour les fenêtres non modifiées, ce sont les paramètres par défaut qui seront alors utilisés.

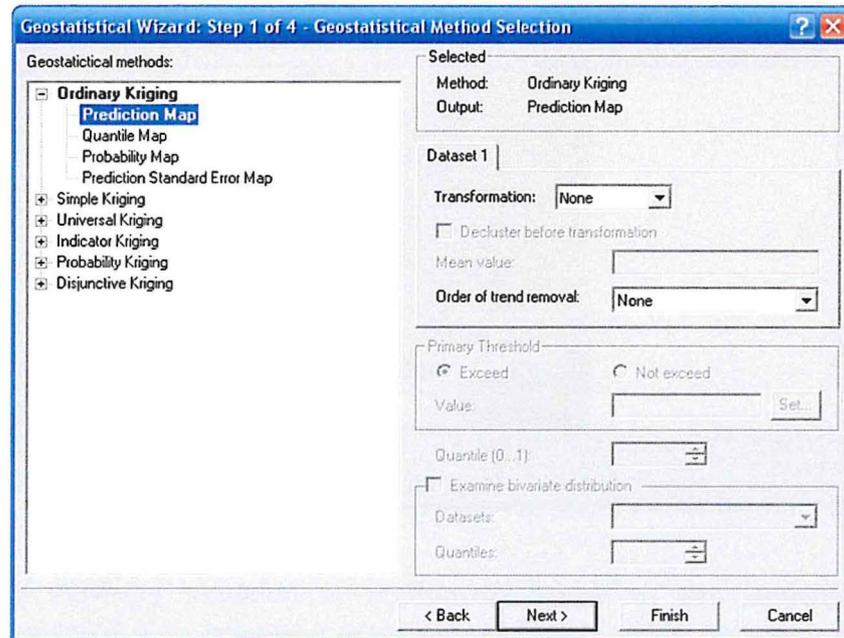
6.1 Première fenêtre : choix des données et de la méthode d'interpolation

Dans cette fenêtre se réalise le choix de la méthode d'interpolation, des données, et du champ sur lesquels pratiquer l'interpolation.

C'est également dans cette première fenêtre qu'est décidé ou non de réaliser un test de validation (en cliquant sur l'onglet « **validation** ») et en y choisissant le jeu de données utilisé pour vérifier les résultats). Une fois réalisé ceci, le reste des étapes est identique à la procédure normale. Les résultats seront présentés en dernière fenêtre, en lieu et place des résultats de la validation croisée (celle-ci est automatisée au sein du Geostatistical Wizard). Les résultats fournis sont sous la même forme que les résultats de la validation croisée.



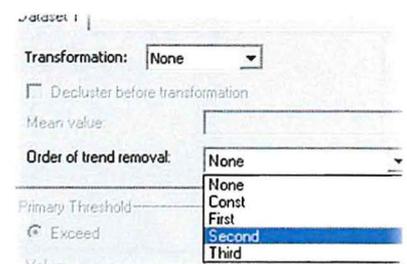
6.2 Deuxième fenêtre : choix du type de krigeage



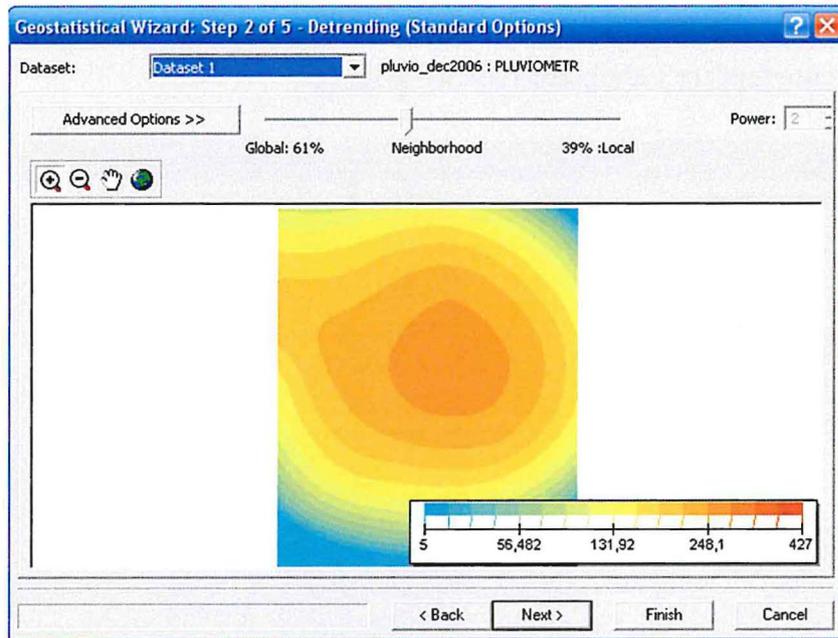
Dans cette fenêtre se réalise :

- le choix du type de krigeage (krigeage ordinaire, krigeage simple, ...),
- de la surface produite (carte, carte d'incertitude, carte de probabilité,...),
- le choix d'une éventuelle transformation des données ou non (voir la rubrique Explore Data),
- le choix d'une dérive (*Trend*) ou non (voir la rubrique Explore Data).

Si l'outil Trend Analysis a fait apparaître une forme en U pour le schéma spatial de la répartition des valeurs, alors c'est l'option « second » (signifiant que c'est un polynôme du second degré qui sera utilisé pour modéliser la dérive) qui devra être choisie dans le menu déroulant « **Order of trend removal** ». Les différentes options du menu « Order of trend removal » peuvent être testées en réalisant des allers-retours entre cette fenêtre et la suivante (boutons « **Back** », « **Next** »).

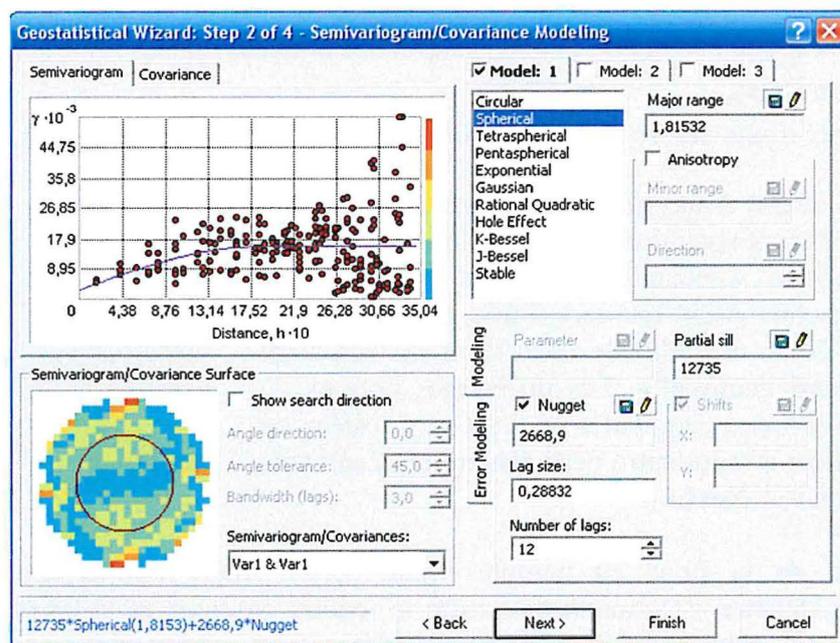


Le choix de la prise en compte d'une dérive libère l'apparition d'une fenêtre supplémentaire (fenêtre « Detrending ») entre la fenêtre en cours et la fenêtre normalement suivante (cliquer « Next »). Cette fenêtre supplémentaire permet de déterminer le rayon d'action de la dérive. Elle affiche la surface correspondante aux valeurs que prend la dérive dans la zone d'étude. Elle permet d'envisager et comparer l'incidence des options choisies pour modéliser la dérive (« Order of trend removal » et rayon d'action).



Note : rappelons que la dérive caractérise la tendance générale de la variable interpolée. Cette tendance générale sera supprimée des données et le krigeage sera pratiqué sur les résidus, la tendance générale étant re-plaquée aux résultats en fin de processus.

6.3 Troisième fenêtre : choix du modèle variographique

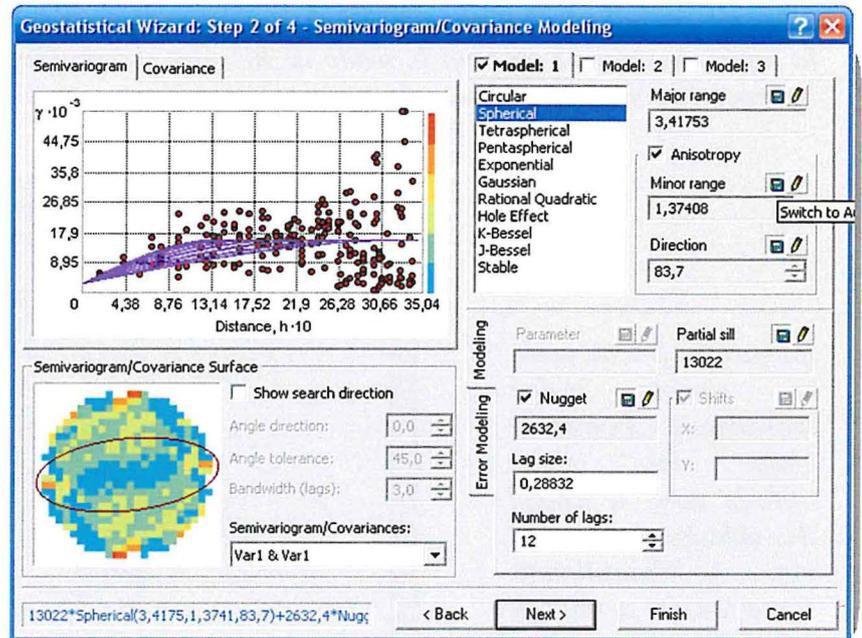


Dans cette fenêtre se réalise :

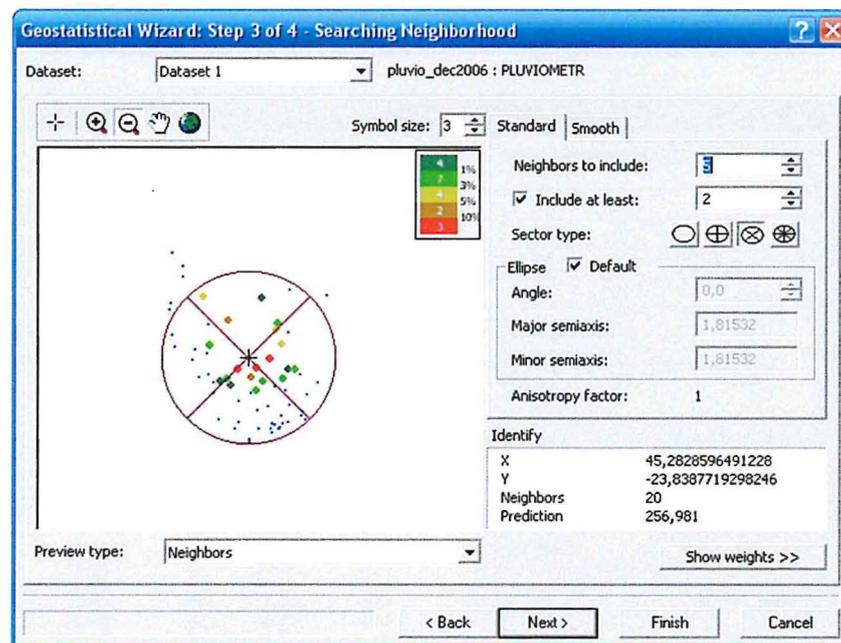
- le choix du modèle variographique,
- le choix de la prise en compte d'une anisotropie ou non,

Comme dans le menu Semivariogram/Covariance Cloud il est possible de rechercher la présence d'une anisotropie grâce à l'option « **Search Direction** » (cocher l'option « Search Direction » puis manipuler la flèche affichée).

Remarque : la prise en compte d'une anisotropie se matérialise au sein de l'affichage de 2 façons : dans la forme du modèle variographique (superposition de plusieurs lignes), et dans la forme ellipsoïdale de la cible au centre de la surface variographique.



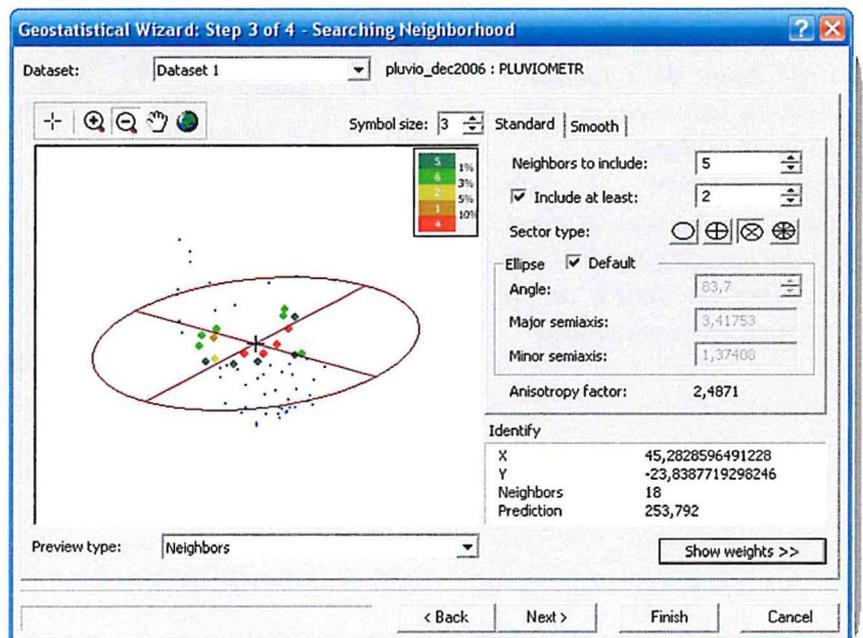
6.4 Quatrième fenêtre : les paramètres de voisinage



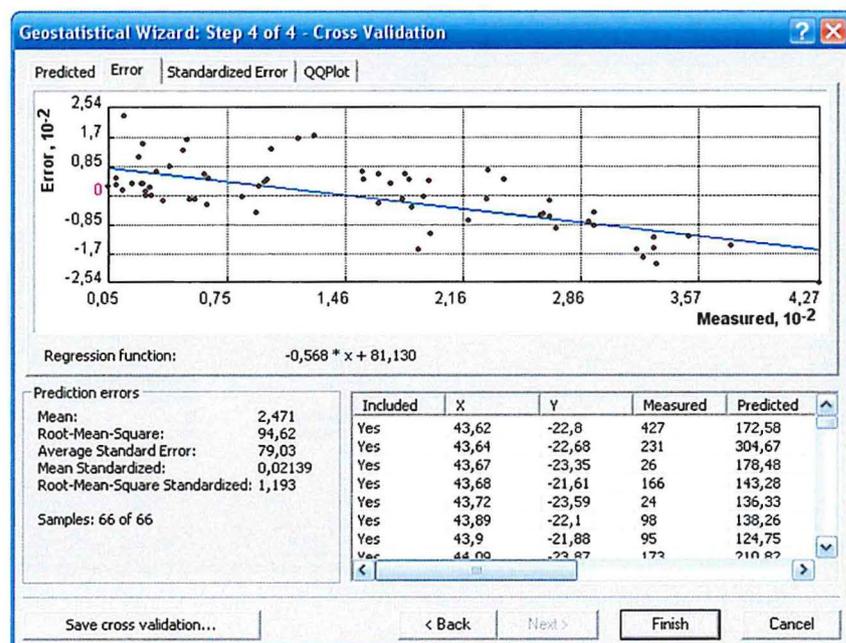
Dans cette fenêtre se réalise le choix des paramètres de voisinage (nombre de points de mesure à inclure pour calculer la valeur prise par la variable interpolée en un point non échantillonné). Des valeurs par défaut sont affectées. Elles peuvent être modifiées.

Remarque : les poids affectés à chaque point de mesure pour la détermination de la valeur de la variable interpolée en un point non échantillonné peuvent être visualisés en cliquant sur le bouton « Show weights » ou, sous la forme de pourcentage (en classes), dans la barre de couleur en haut à droite de la carte de voisinage. Pour sélectionner le point à interpoler recherché : (pointer le curseur à l'emplacement désiré sur la carte de voisinage).

Remarque 2 : la prise en compte d'une anisotropie change le choix des points utilisés dans le calcul des valeurs en un point non échantillonné. Cette fenêtre permet de l'illustrer.



6.5 Cinquième fenêtre : résultats du test de validation croisée (*crossvalidation*)



Cette dernière étape sert à valider les choix qui ont été faits dans les étapes précédentes.

Le test consiste à retirer successivement du jeu de données chaque point de mesure pour procéder à l'interpolation sans celui-ci et évaluer, à son emplacement, la différence entre valeur prédite par l'interpolation et valeur effectivement mesurée sur le terrain. C'est-à-dire que tous les points de mesure deviennent l'un après l'autre des points de contrôle pour comparer résultats de l'interpolation et réalité mesurée sur le terrain.

Les résultats sont traités et présentés sous trois formes :

- les résultats pour chaque point de mesure, présentés dans une table exportable au format database (.dbf),
- des indicateurs moyens calculés pour l'ensemble du jeu de données
- des graphiques

Les résultats proposés pour chaque point de mesure (en bas à droite de la fenêtre) récapitulent pour chacun des points :

- la valeur mesurée, notée *Measured*
- la valeur prédite, notée *Predicted*
- l'erreur potentielle estimée (*Standard Error*), notée *Std Error*
- l'erreur observée²² lors de la validation croisée, notée *Error*
- l'erreur réduite (*Standardized Error*), notée *Stdd Error*
- la valeur de l'erreur réduite dans le cas d'une distribution normale des données, notée *NormValue*

Il est possible de sauvegarder dans une table dbf ces résultats.

OID	X	Y	Measured	Predicted	StdError	Error	Stdd Error	NormValue
0	43,62	-22,8	427	172,583341	79,219775	-254,416659	-3,21153	-2,428737
1	43,64	-22,68	231	304,674887	79,499011	73,674887	0,92674	1,062766
2	43,67	-23,35	26	178,484303	85,788514	152,484303	1,777444	1,816156
3	43,68	-21,61	166	143,275982	102,890423	-22,724018	-0,220856	-0,451658
4	43,72	-23,59	24	136,329842	85,25666	112,329842	1,317549	1,290233
5	43,89	-22,1	98	138,257093	83,910778	40,257093	0,479761	0,328645
6	43,9	-21,88	95	124,753793	82,835379	29,753793	0,359192	0,057
7	44,09	-23,87	173	210,819441	79,125072	37,819441	0,47797	0,288809
8	44,14	-23,65	319	164,480051	76,215636	-154,519949	-2,027405	-1,48947
9	44,23	-24,22	182	246,355321	81,00029	64,355321	0,794507	0,825494
10	44,32	-22,53	52	215,514473	97,741477	163,514473	1,672928	1,382994
11	44,38	-23,72	262	205,85616	73,470826	-56,14384	-0,764165	-0,722972
12	44,42	-23,12	331	130,71969	86,735376	-200,28031	-2,309096	-2,000424
13	44,43	-24,17	264	212,527771	73,937176	-51,472229	-0,696162	-0,67449
14	44,44	-23,57	219	148,436825	67,430426	-70,563175	-1,046459	-0,880132
15	44,46	-23,53	15	248,704274	69,127453	233,704274	3,380774	2,428737
16	44,52	-24,35	230	221,281299	70,820422	-8,718701	-0,12311	-0,210428
17	44,53	-24,55	323	143,812955	79,74411	-179,187045	-2,247025	-1,77585
18	44,53	-25,11	42	130,001762	93,770148	88,001762	0,938484	1,13214
19	44,67	-24,3	157	206,862018	69,578032	49,862018	0,716634	0,67449
20	44,8	-24,27	180	169,453239	70,507336	-10,546761	-0,149584	-0,328645
21	44,83	-23,02	156	227,401273	95,160385	71,401273	0,750326	0,773217
22	44,9	-24,39	50	181,104196	73,844264	131,104196	1,775415	1,48947
23	44,97	-25,31	25	61,079797	77,379319	36,079797	0,466272	0,210428

²² La valeur de l'erreur sera positive ou négative suivant la sous- ou la surestimation de la prédiction par rapport à la pluviométrie effectivement mesurée sur le terrain.

Les résultats moyens pour l'ensemble du jeu de données (en bas à gauche de la fenêtre) concernent :

- la valeur moyenne des erreurs observées (*Mean Prediction Errors*),
- l'écart-type des erreurs observées (*Root-Mean-Square Prediction Errors*)

Plus la moyenne est proche de 0 et plus l'écart-type est faible, plus l'interpolation envisage bien la pluviométrie par rapport à la réalité mesurée sur le terrain.

- la moyenne des erreurs potentielles estimées (*Average Standard Error*),
- la moyenne des erreurs réduites (*Mean Standardized Prediction Errors*),
- l'écart-type de l'erreur réduite (*Root-Mean-Square Standardized Prediction Errors*)

*Ces trois indicateurs permettent de vérifier si au sein de la méthode d'interpolation testée l'incertitude théorique est bien envisagée en comparant erreur potentielle estimée (*Standard Error*) et erreur observée (*Error*), et permettent ainsi d'évaluer la véracité des cartes d'incertitude. Si la méthode estime parfaitement l'incertitude, alors :*

- *la moyenne des erreurs potentielles estimées (*Average Standard Errors*) doit être égale à l'écart-type des erreurs observées (*Root-Mean-Square Prediction Errors*) ;*
- *et le rapport des deux, l'écart-type de l'erreur réduite (*Root-Mean-Square Standardized Prediction Errors*) doit alors être égale à 1.*

*Donc, plus l'écart-type de l'erreur réduite (*Root-Mean-Square Standardized Prediction Errors*) est proche de 1, mieux la méthode évalue l'incertitude associée à ses prédictions.*

Les graphiques

Le premier graphique (onglet « **Predicted** ») confronte les valeurs tirées de l'interpolation et les valeurs effectivement relevées sur le terrain. L'allure moyenne des résultats de l'interpolation est indiquée par la ligne bleue. La droite en pointillé représente le cas d'une situation où $x = y$ (valeur mesurée = valeur interpolée).

Le second graphique (onglet « **Error** ») affiche en ordonnée l'erreur observée lors de la validation croisée et en abscisse les valeurs mesurées. Plus les points du graphique sont proches de l'ordonnée 0, meilleurs sont les résultats de l'interpolation.

Le troisième graphique (onglet « **Standardized Error** ») se présente sur le même modèle que le précédent. De même, plus les points du graphique sont proches de l'ordonnée 0, meilleurs sont les résultats de l'interpolation.

Le dernier graphique (onglet « **QQPlot** ») compare la valeur de l'erreur réduite observées pour les points testés et la valeur que ces erreurs réduites auraient dans le cas d'une distribution normale des données (ligne pointillée).

6.6 Lancer l'interpolation

Pour lancer l'interpolation : cliquer « **Finish** ».

La surface interpolée s'affiche dans ArcMap. Elle est au format Geostatistical Analyst Layer. Elle doit être enregistrée pour être conservée. Elle peut être exportée au format vecteur

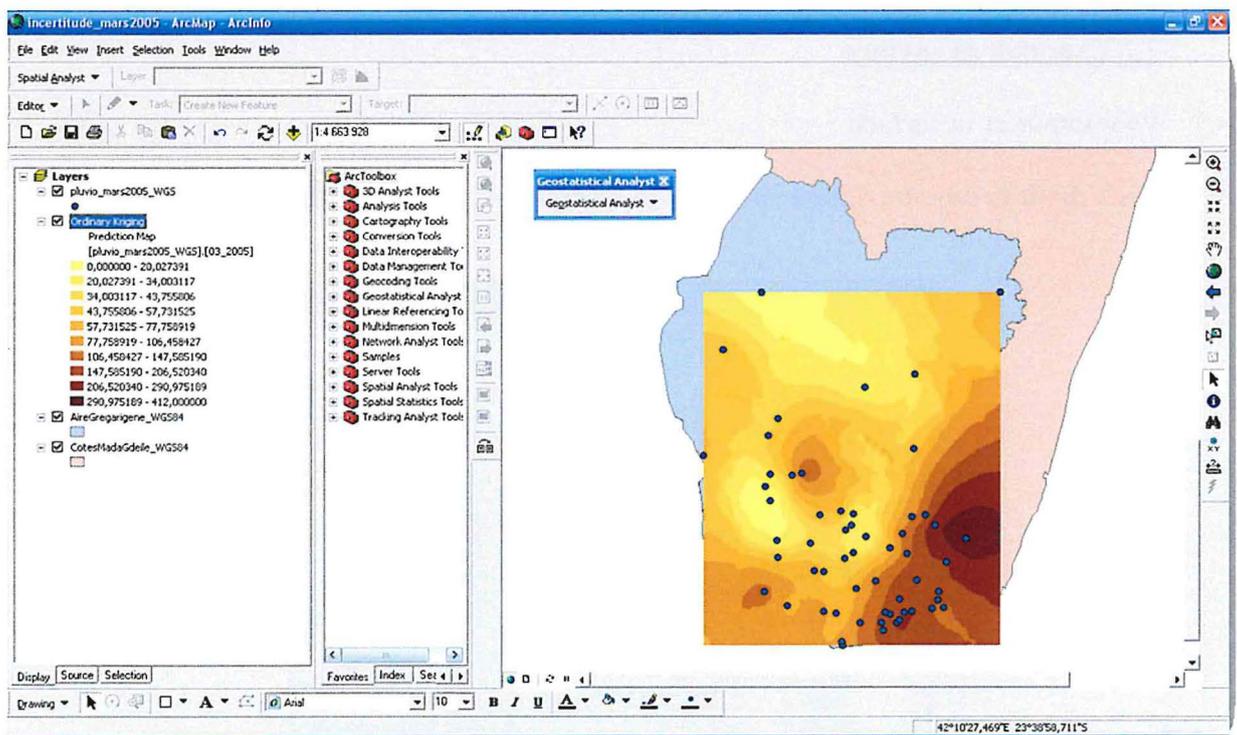
ou au format raster. L'exportation au format vecteur prendra en compte les classes de valeurs fixées dans la symbologie.

La symbologie est manipulable de la même façon que pour tout layer (**click droit sur la couche / Properties / Symbology**).

7 - Manipulations supplémentaires : régler l'étendue (*extent*), exporter le layer

7.1 Régler l'étendue (*extent*)

La surface produite est cantonnée dans les limites des points aux coordonnées les plus extrêmes (extrême nord, extrême sud, extrême est, extrême ouest).



Pour obtenir une surface s'étendant hors de ces limites (c'est-à-dire réaliser une extrapolation), par exemple sur l'ensemble de l'Aire grégarigène, il faut régler l'étendue (*extent*) :

Click droit sur la couche / Properties / Extent

Puis manipuler le menu déroulant « **Set the extent to** » pour calquer l'étendue du layer sur une couche référence (par exemple «AireGregarigene »).

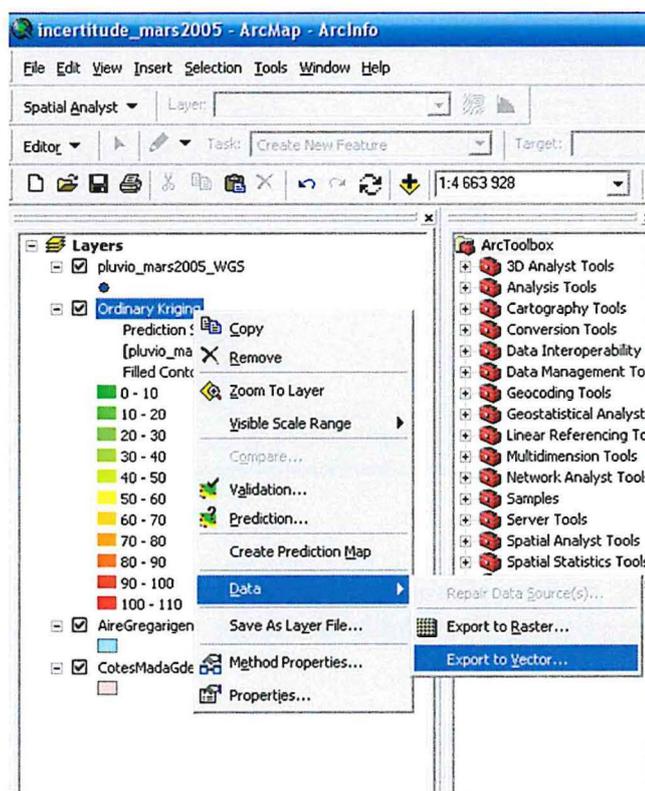
L'étendue du layer recouvre alors l'ensemble de la surface souhaitée (aire grégarigène), mais elle est toujours rectangulaire. Deux procédures sont alors possibles pour découper la surface interpolée selon les limites souhaitées :

- exporter au format vecteur ou raster puis réaliser un découpage (outil « **Clip** » au sein de la Toolbox « **Analysis Tools** ») ;
- ou **click droit sur l'icône « couches »** (« **layers** » pour la version anglaise) de l'arborescence d'ArcMap / **Propriétés** / onglet « **Data Frame** » / valider « **Clip to Shape** » et choisir les limites de référence (par exemple « AireGregarigene ») avec le bouton « **Specify shape** ». *Attention ! : cette procédure découpe toutes les couches selon les limites fixées. Par ailleurs, cette procédure pose des problèmes pour un export ultérieur vers le format Shapefile (les contours de l'aire grégarigène sont ajoutés comme polygones supplémentaires avec pour attributs les valeurs minimales définies dans la symbologie, ce qui aura alors des conséquences pour des calculs de surfaces concernées par une incertitude donnée). Il est donc préférable d'utiliser la première procédure.*

7.2 Exporter la surface

Pour exporter la surface :

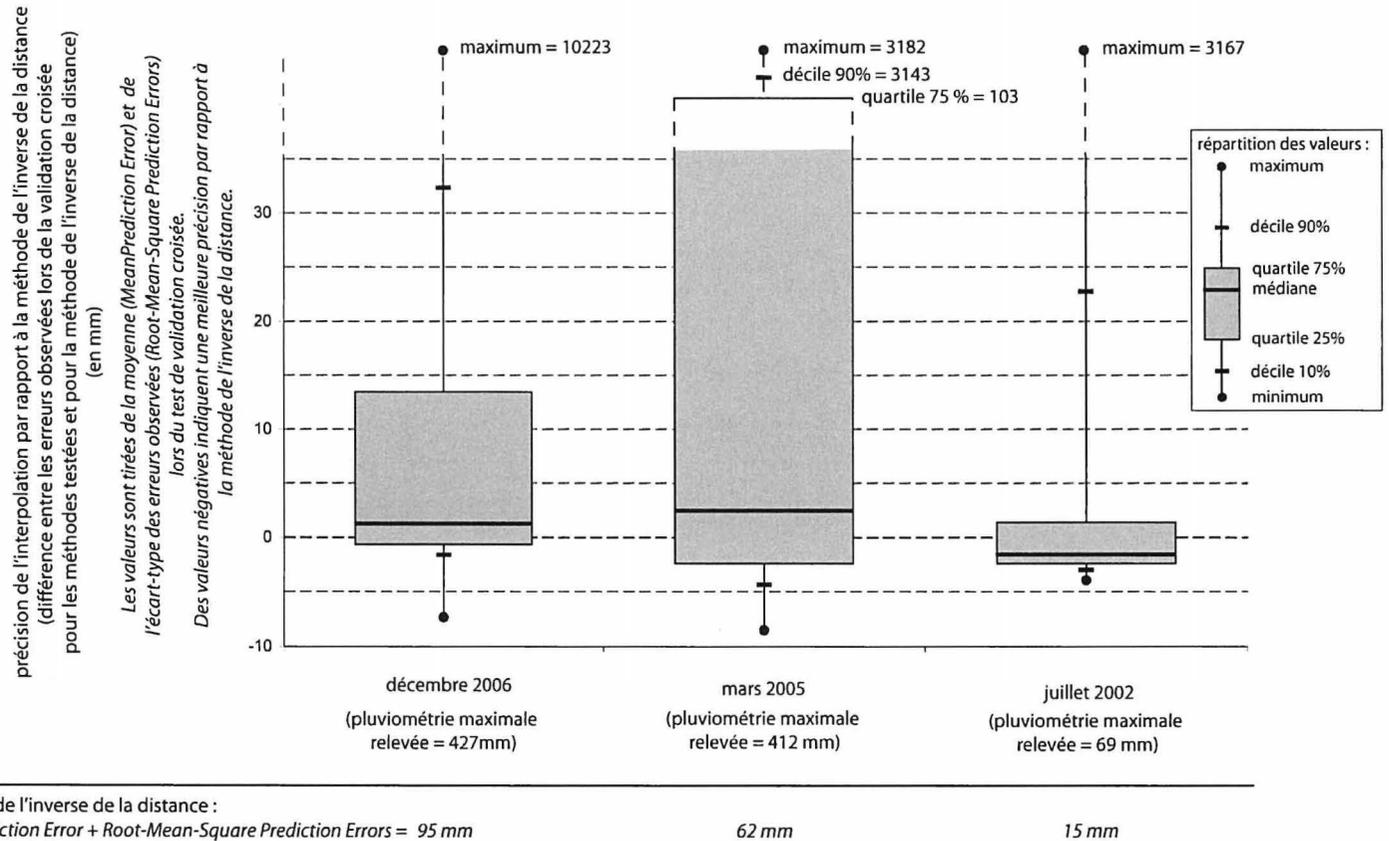
click droit la couche / Data / Export to Vector (ou Export to Raster)



**ANNEXE 4 : Graphiques utilisés pour la sélection d'une méthode
d'interpolation préférentielle**

Graphique 1 :

Interpolation des données pluviométriques : performances du krigeage, tous types de krigeage (krigeage ordinaire, krigeage universel, krigeage simple, krigeage disjonctif) et tous paramètres (modèles variographique, dérive, anisotropie) confondus, sur le plan de la précision moyenne des interpolations, par rapport à la méthode de l'inverse de la distance.

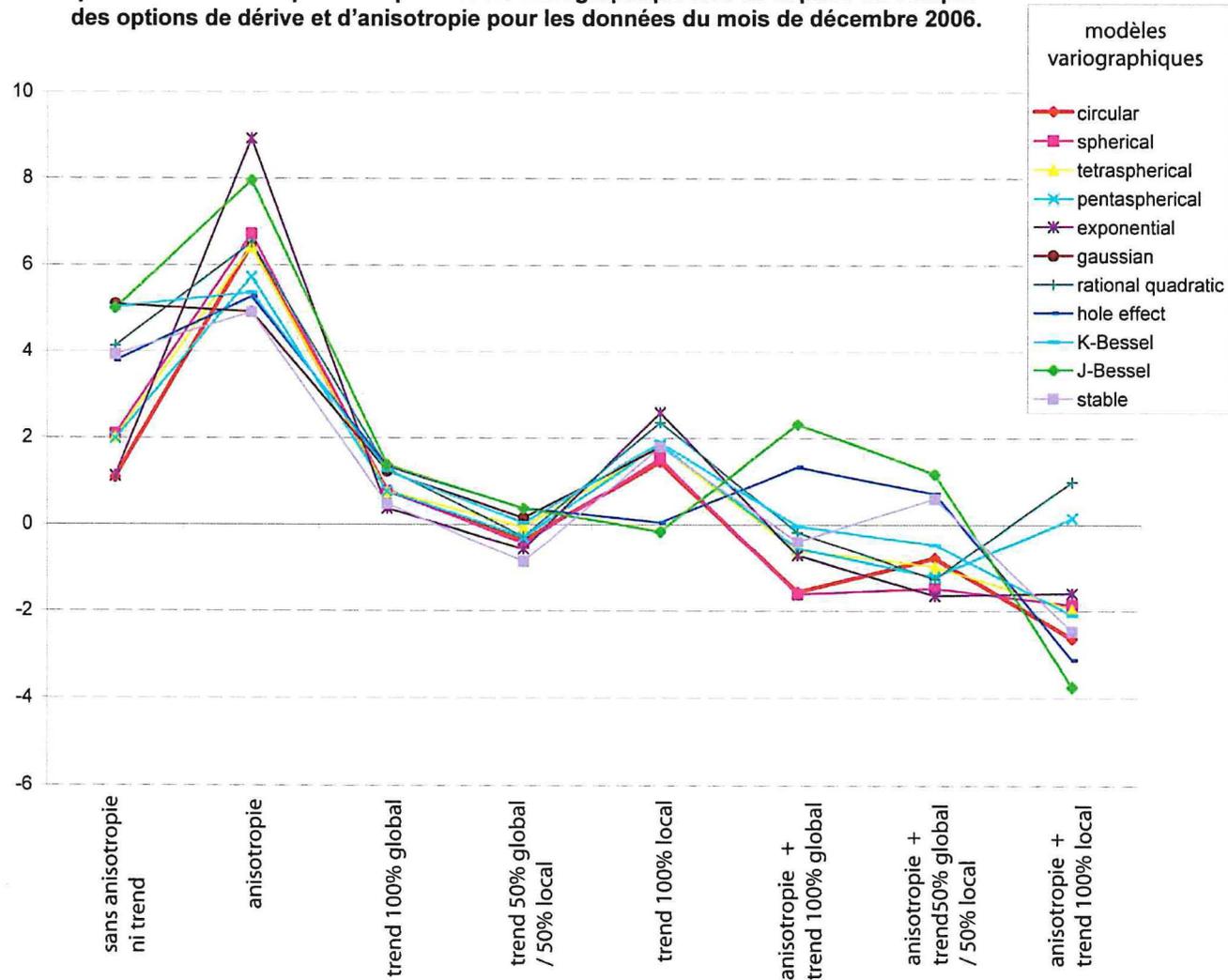


Graphique 3 :

**Interpolation des données pluviométriques par la méthode krigeage ordinaire :
précision observée pour chaque modèle variographique lors de la prise en compte
des options de dérive et d'anisotropie pour les données du mois de décembre 2006.**

précision de l'interpolation par rapport à la méthode de l'inverse de la distance
(différence entre les erreurs observées lors de la validation croisée
entre méthodes testées et méthode de l'inverse de la distance)
(en mm)

Les valeurs sont tirées de la moyenne (MeanPrediction Error) et de
l'écart-type des erreurs observées (Root-Mean-Square Prediction Errors)
lors du test de validation croisée.
Des valeurs négatives indiquent une meilleure précision par rapport à
la méthode de l'inverse de la distance.

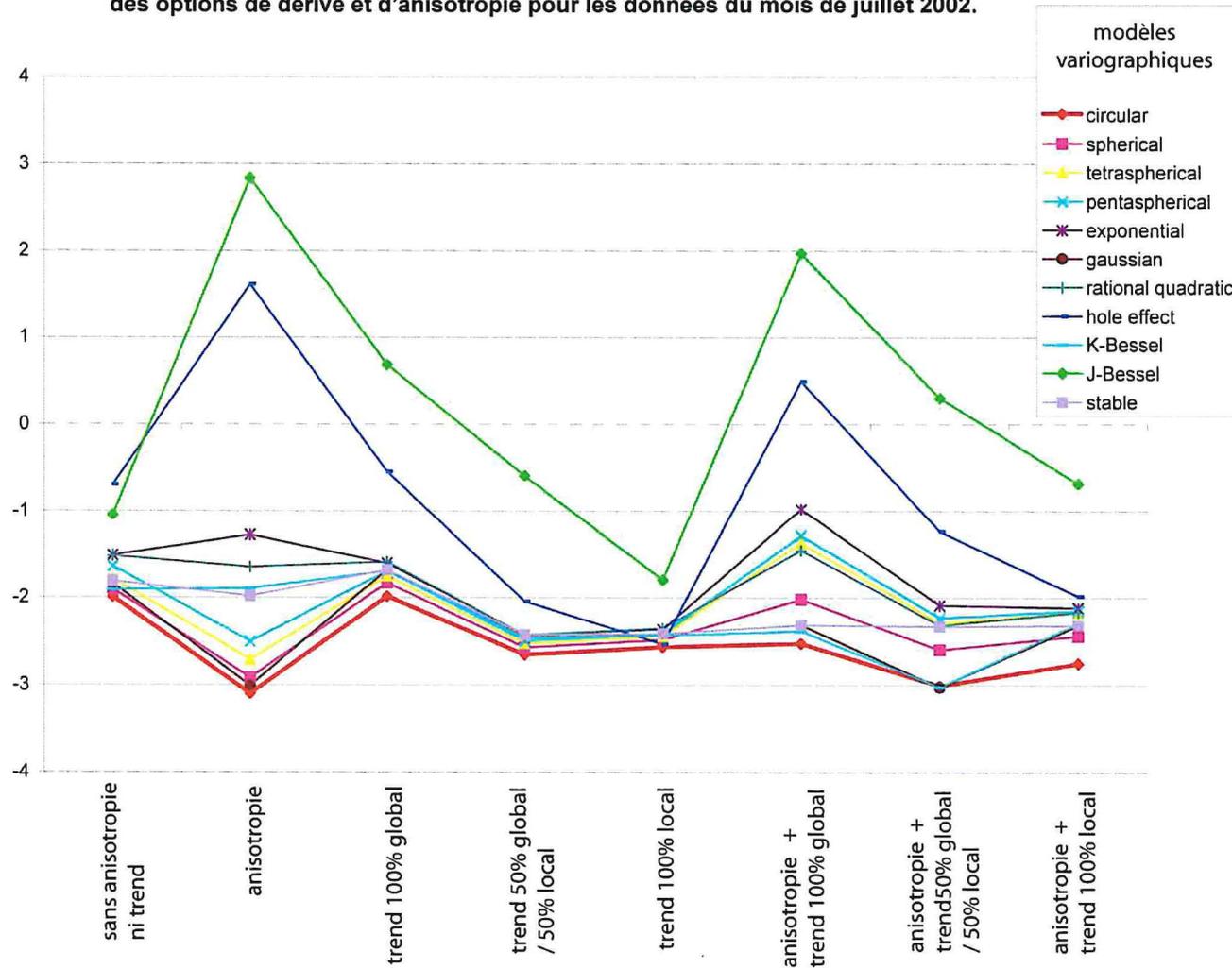


Graphique 4 :

Interpolation des données pluviométriques par la méthode krigeage ordinaire : précision observée pour chaque modèle variographique lors de la prise en compte des options de dérive et d'anisotropie pour les données du mois de juillet 2002.

précision de l'interpolation par rapport à la méthode de l'inverse de la distance (différence entre les erreurs observées lors de la validation croisée entre méthodes testées et méthode de l'inverse de la distance) (en mm)

Les valeurs sont tirées de la moyenne (Mean Prediction Error) et de l'écart-type des erreurs observées (Root-Mean-Square Prediction Errors) lors du test de validation croisée.
Des valeurs négatives indiquent une meilleure précision par rapport à la méthode de l'inverse de la distance.

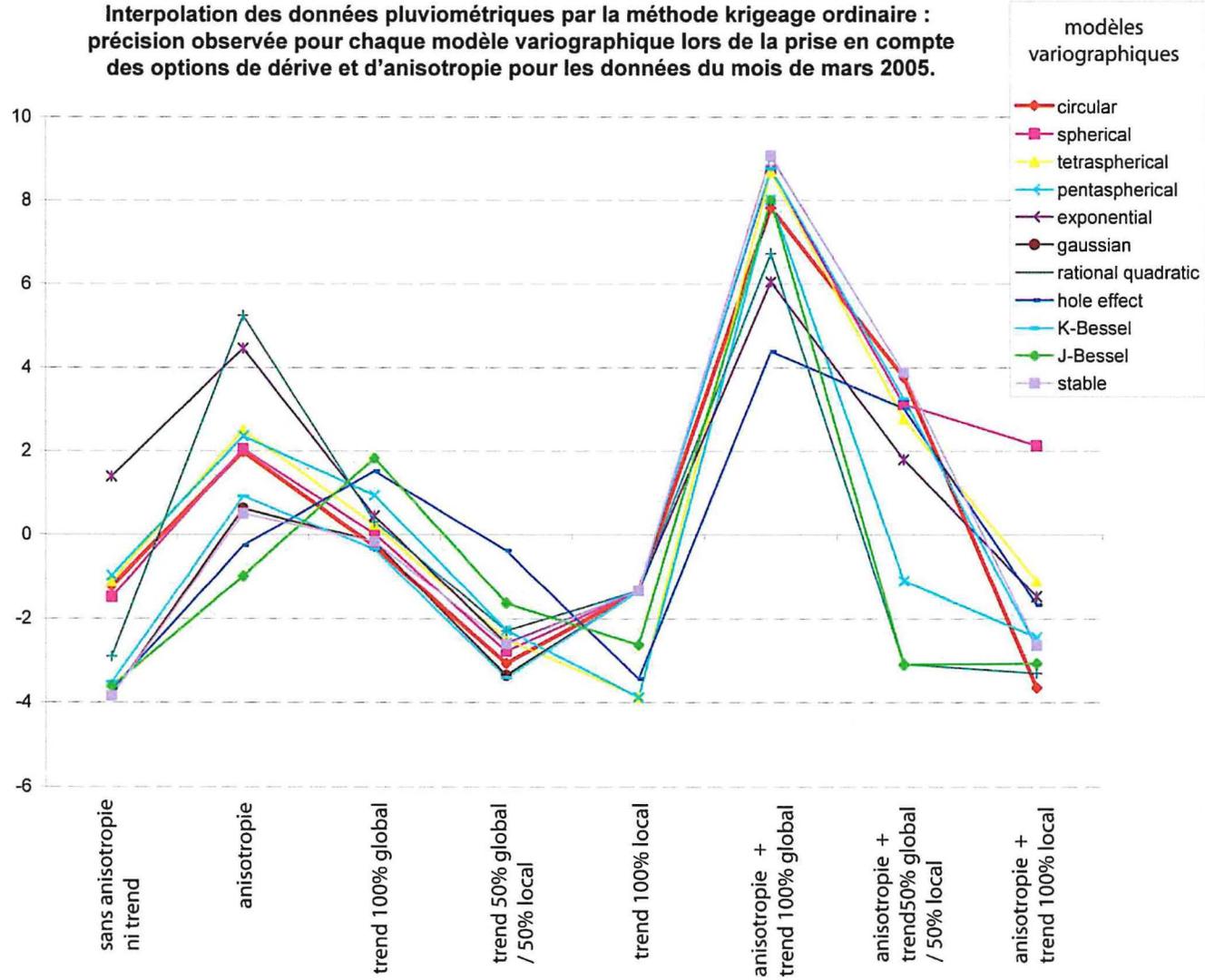


Graphique 5 :

**Interpolation des données pluviométriques par la méthode krigeage ordinaire :
précision observée pour chaque modèle variographique lors de la prise en compte
des options de dérive et d'anisotropie pour les données du mois de mars 2005.**

précision de l'interpolation par rapport à la méthode de l'inverse de la distance
(différence entre les erreurs observées lors de la validation croisée
entre méthodes testées et méthode de l'inverse de la distance)
(en mm)

Les valeurs sont tirées de la moyenne (Mean Prediction Error) et de
l'écart-type des erreurs observées (Root-Mean-Square Prediction Errors)
lors du test de validation croisée.
Des valeurs négatives indiquent une meilleure précision par rapport à
la méthode de l'inverse de la distance.

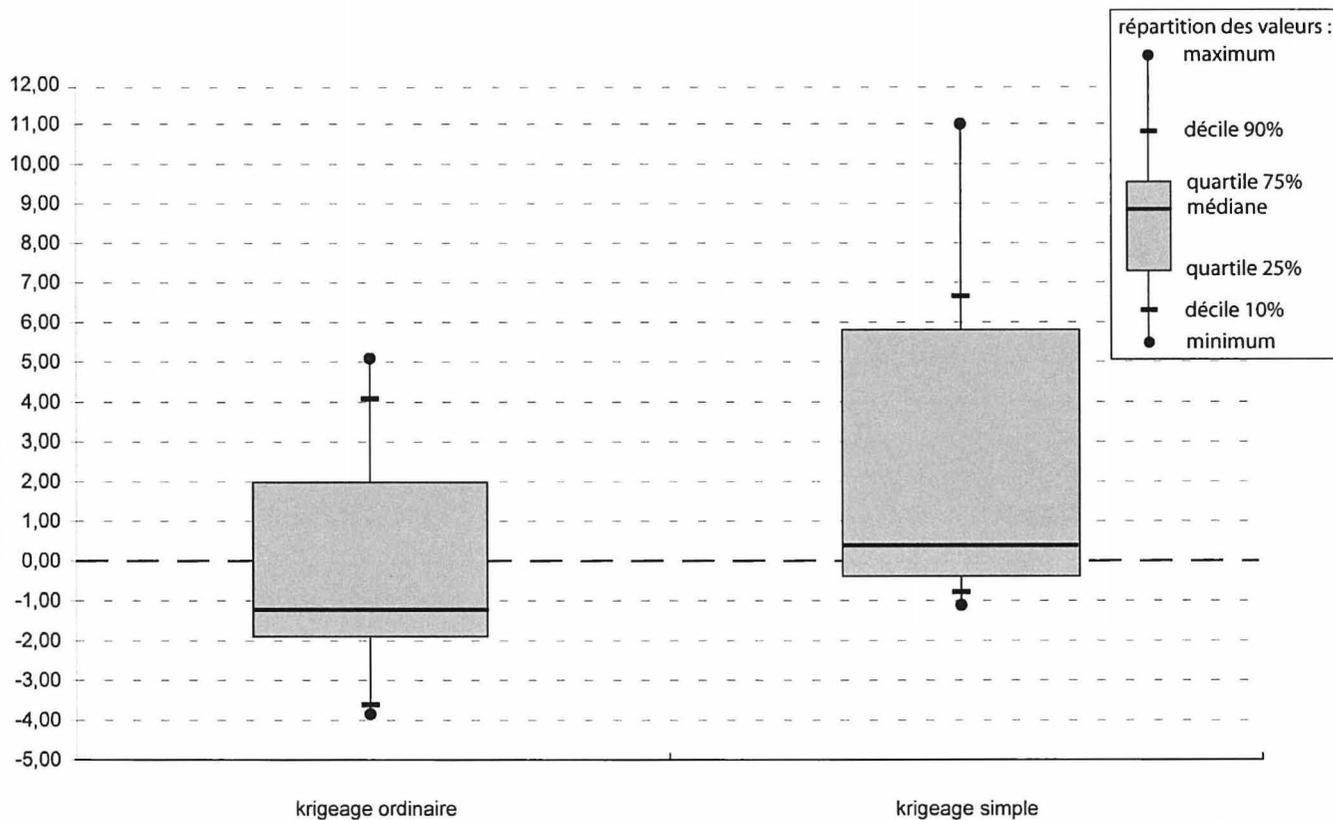


Graphique 6 :

Interpolation des données pluviométriques : précision observée pour chaque méthode, tous modèles variographiques confondus, sur l'ensemble des jeux de données testés, en comparaison de la précision observée pour la méthode de l'inverse de la distance.

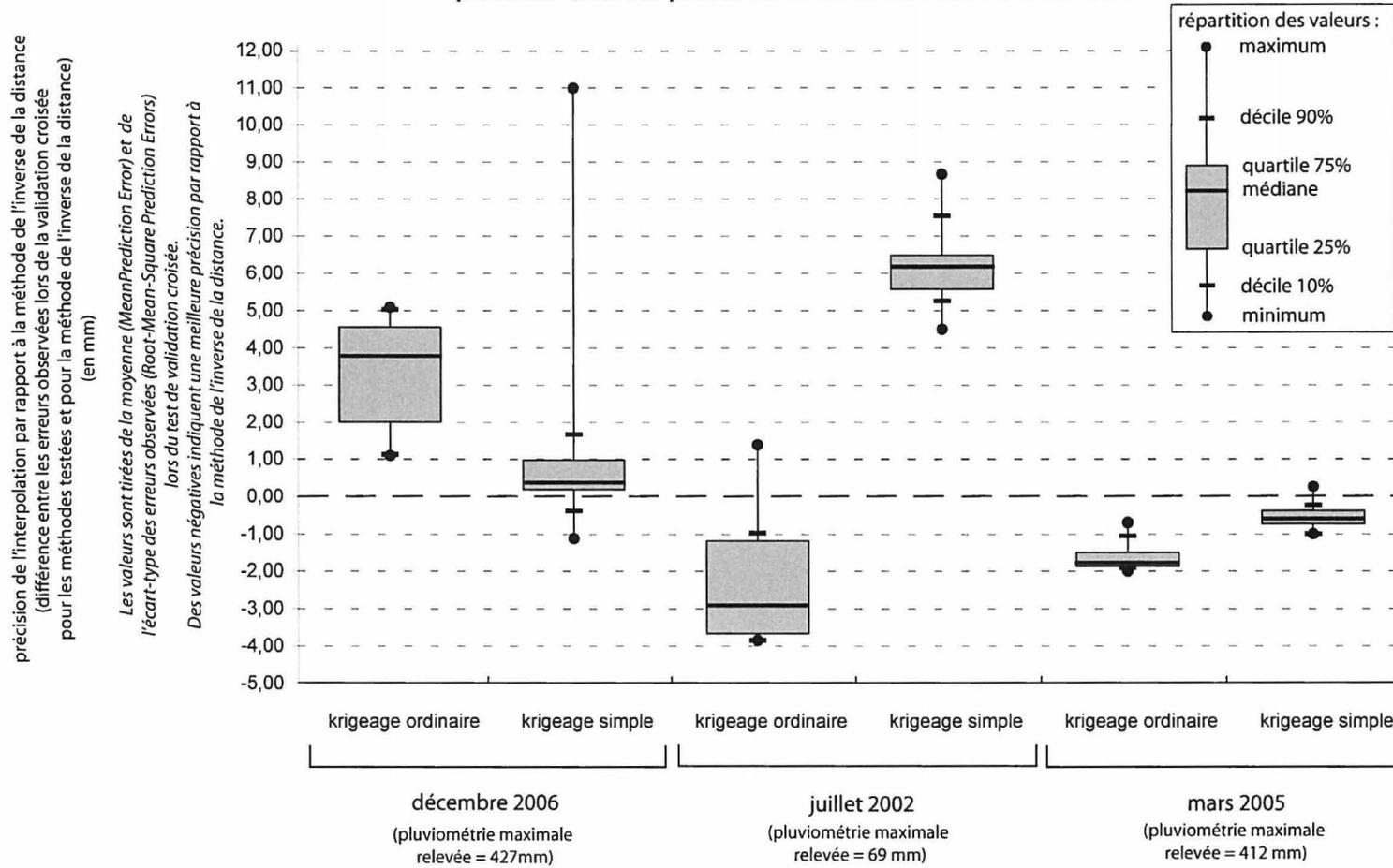
précision de l'interpolation par rapport à la méthode de l'inverse de la distance
(différence entre les erreurs observées lors de la validation croisée
pour les méthodes testées et pour la méthode de l'inverse de la distance)
(en mm)

Les valeurs sont tirées de la moyenne (MeanPrediction Error) et de
l'écart-type des erreurs observées (Root-Mean-Square Prediction Errors)
lors du test de validation croisée.
Des valeurs négatives indiquent une meilleure précision par rapport à
la méthode de l'inverse de la distance.



Graphique 7 :

Interpolation des données pluviométriques : précision observée pour chaque méthode, tous modèles variographiques confondus, sur chaque jeu de données testé, en comparaison de la précision observée pour la méthode de l'inverse de la distance.



méthode de l'inverse de la distance :
MeanPrediction Error + Root-Mean-Square Prediction Errors = 95 mm

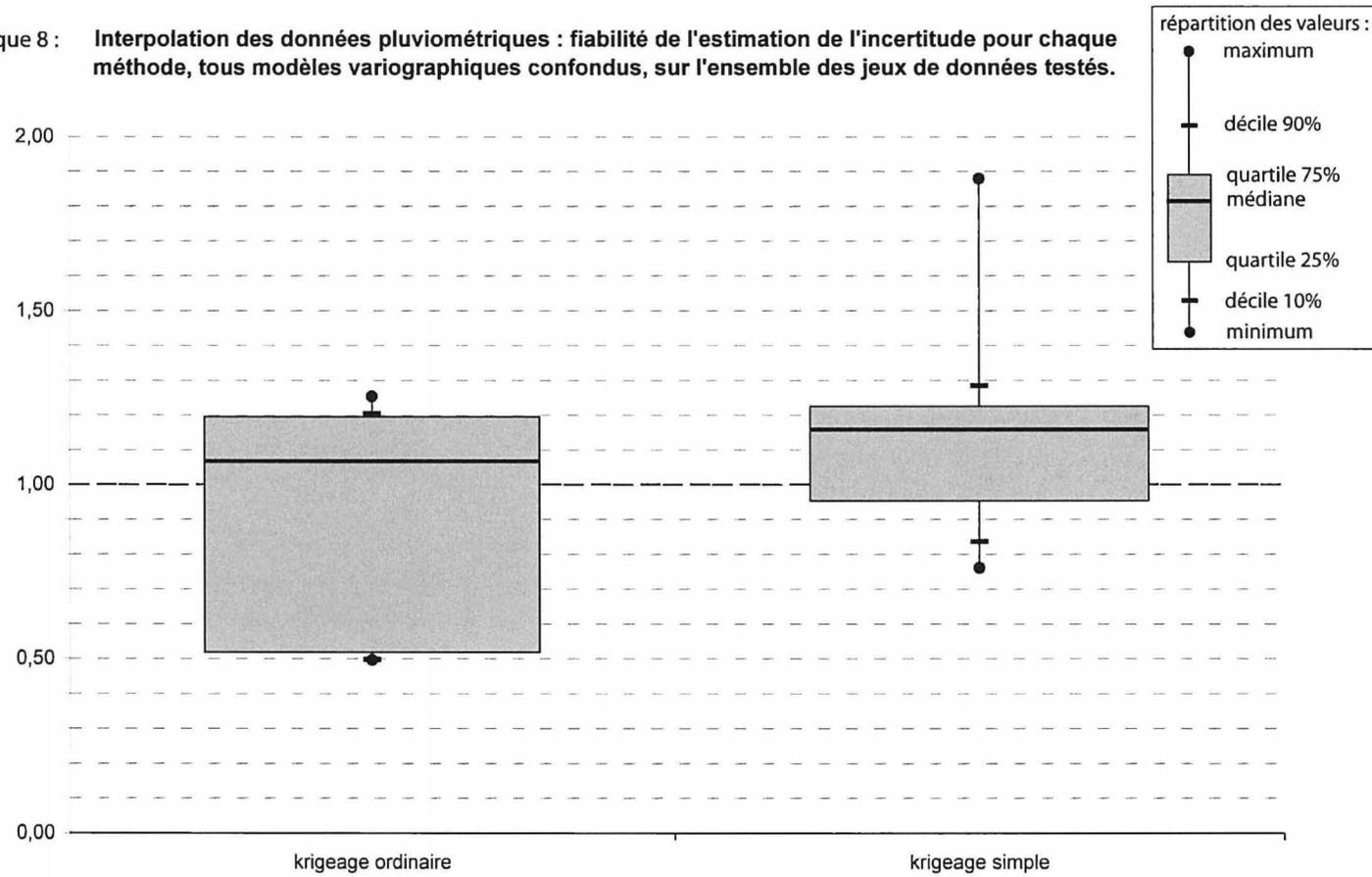
15 mm

62 mm

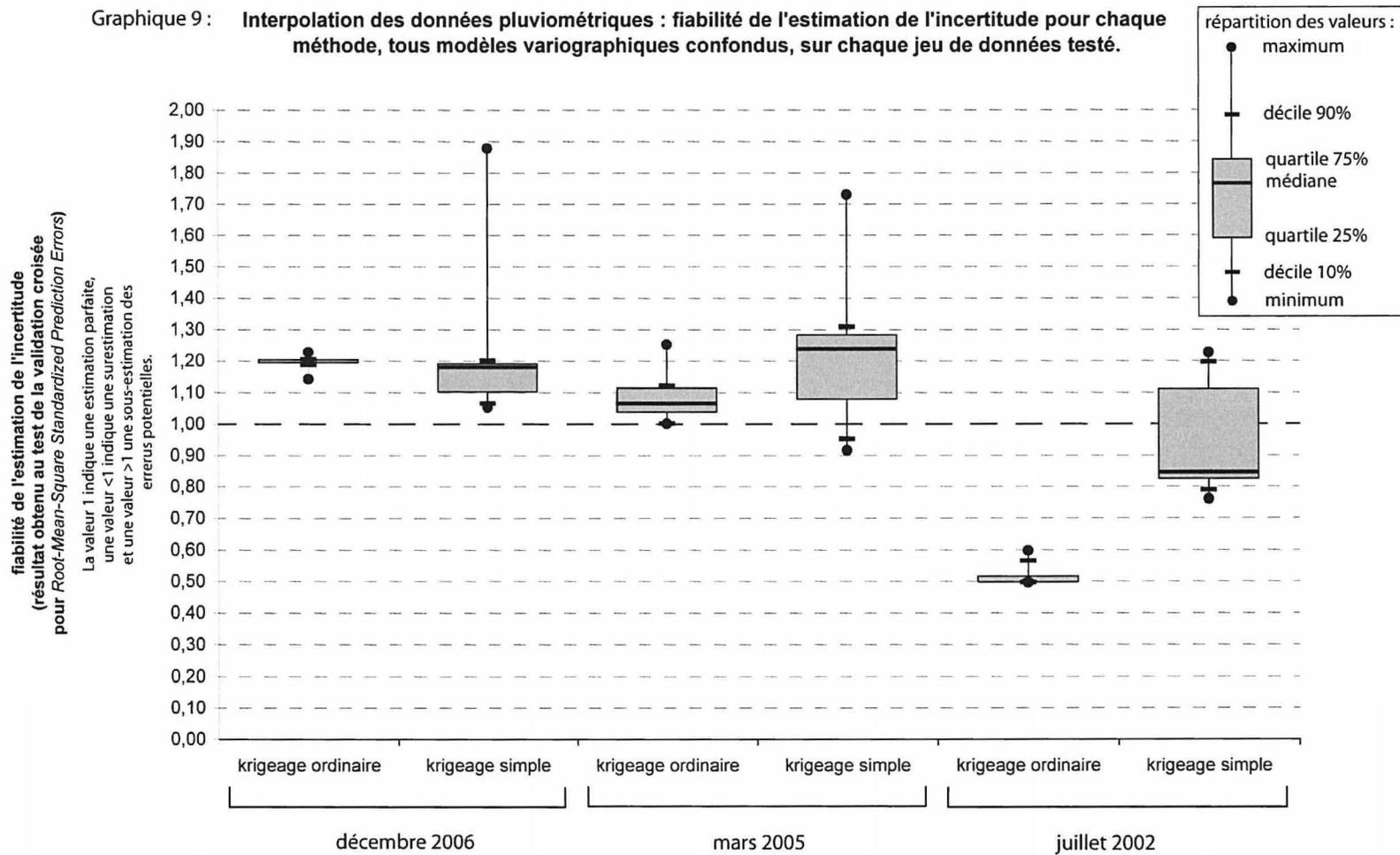
fiabilité de l'estimation de l'incertitude
(résultat obtenu au test de la validation croisée
pour *Root-Mean-Square Standardized Prediction Errors*)

La valeur 1 indique une estimation parfaite,
une valeur <1 indique une surestimation
et une valeur >1 une sous-estimation des
erreurs potentielles.

Graphique 8 : Interpolation des données pluviométriques : fiabilité de l'estimation de l'incertitude pour chaque méthode, tous modèles variographiques confondus, sur l'ensemble des jeux de données testés.



Graphique 9 : Interpolation des données pluviométriques : fiabilité de l'estimation de l'incertitude pour chaque méthode, tous modèles variographiques confondus, sur chaque jeu de données testé.

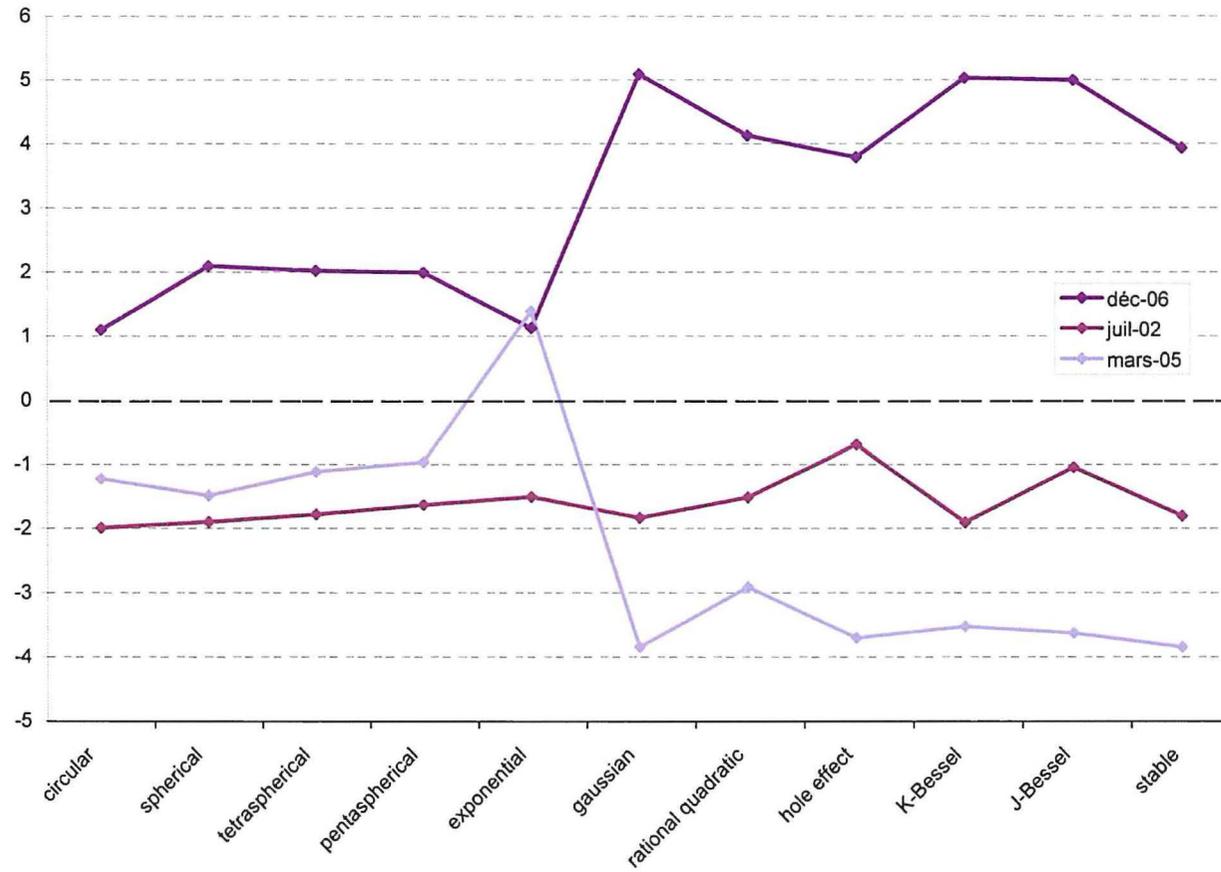


Graphique 10 :

Interpolation des données pluviométriques : précision observée pour chaque modèle variographique, appliqué au krigeage ordinaire, sur chaque jeu de données testé, en comparaison de la précision observée pour la méthode de l'inverse de la distance.

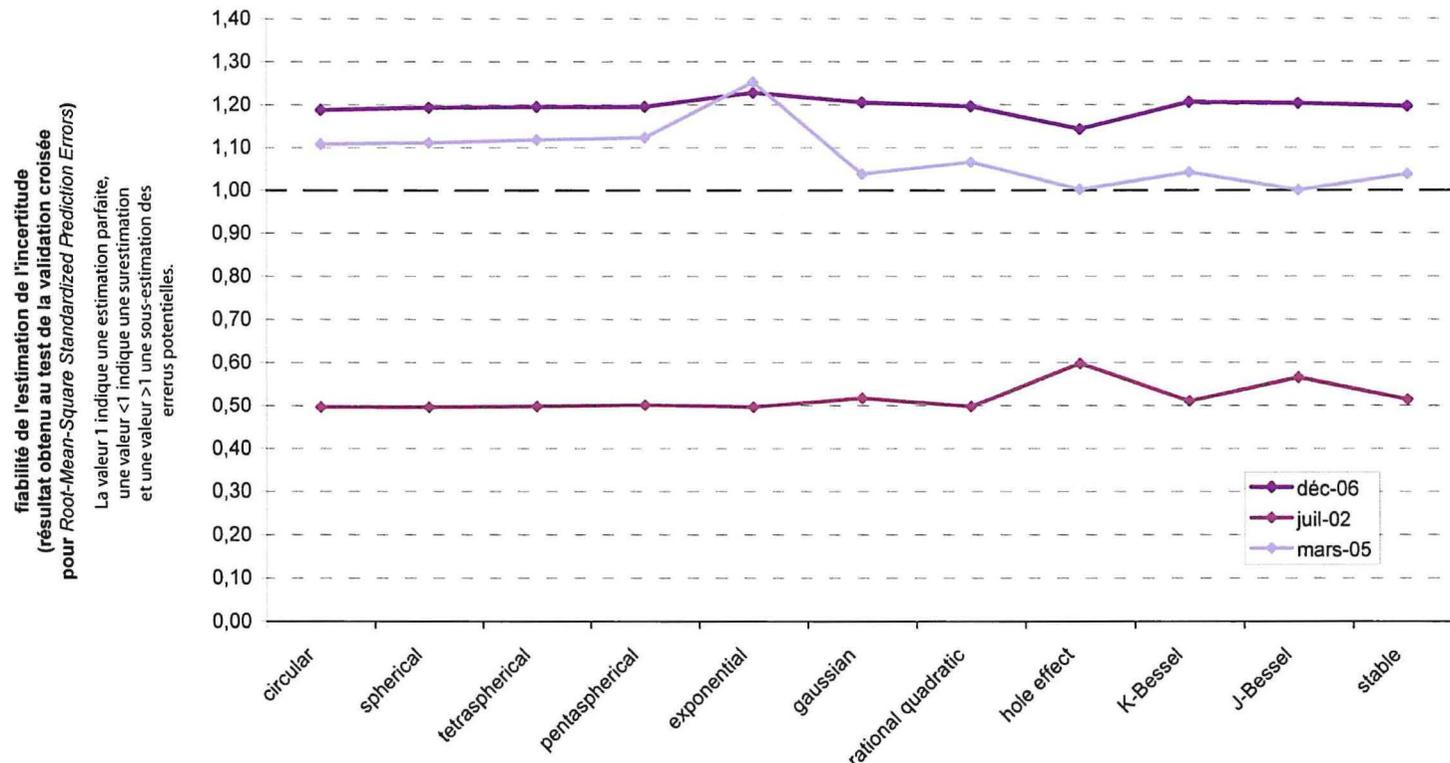
précision de l'interpolation par rapport à la méthode de l'inverse de la distance
(différence entre les erreurs observées lors de la validation croisée
pour les méthodes testées et pour la méthode de l'inverse de la distance)
(en mm)

Les valeurs sont tirées de la moyenne (Mean Prediction Error) et de
l'écart-type des erreurs observées (Root-Mean-Square Prediction Errors)
lors du test de validation croisée.
Des valeurs négatives indiquent une meilleure précision par rapport à
la méthode de l'inverse de la distance.



Graphique 11 :

Interpolation des données pluviométriques : fiabilité de l'estimation de l'incertitude pour chaque modèle variographique, appliqué au krigeage ordinaire, sur chaque jeu de données testé.

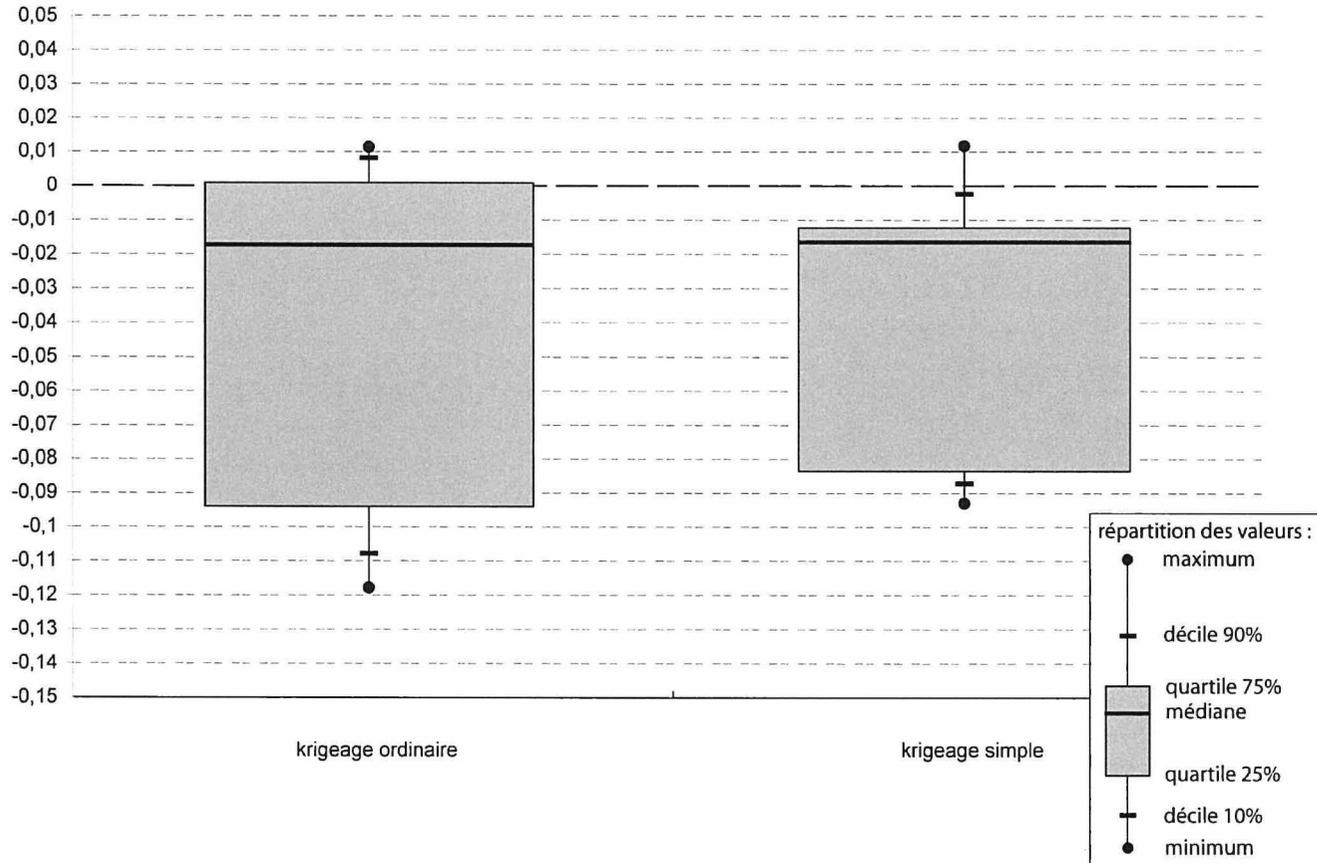


Graphique 12 :

Interpolation des données acridiennes : précision observée pour chaque méthode, tous modèles variographiques confondus, sur l'ensemble des jeux de données testés, en comparaison de la précision observée pour la méthode de l'inverse de la distance.

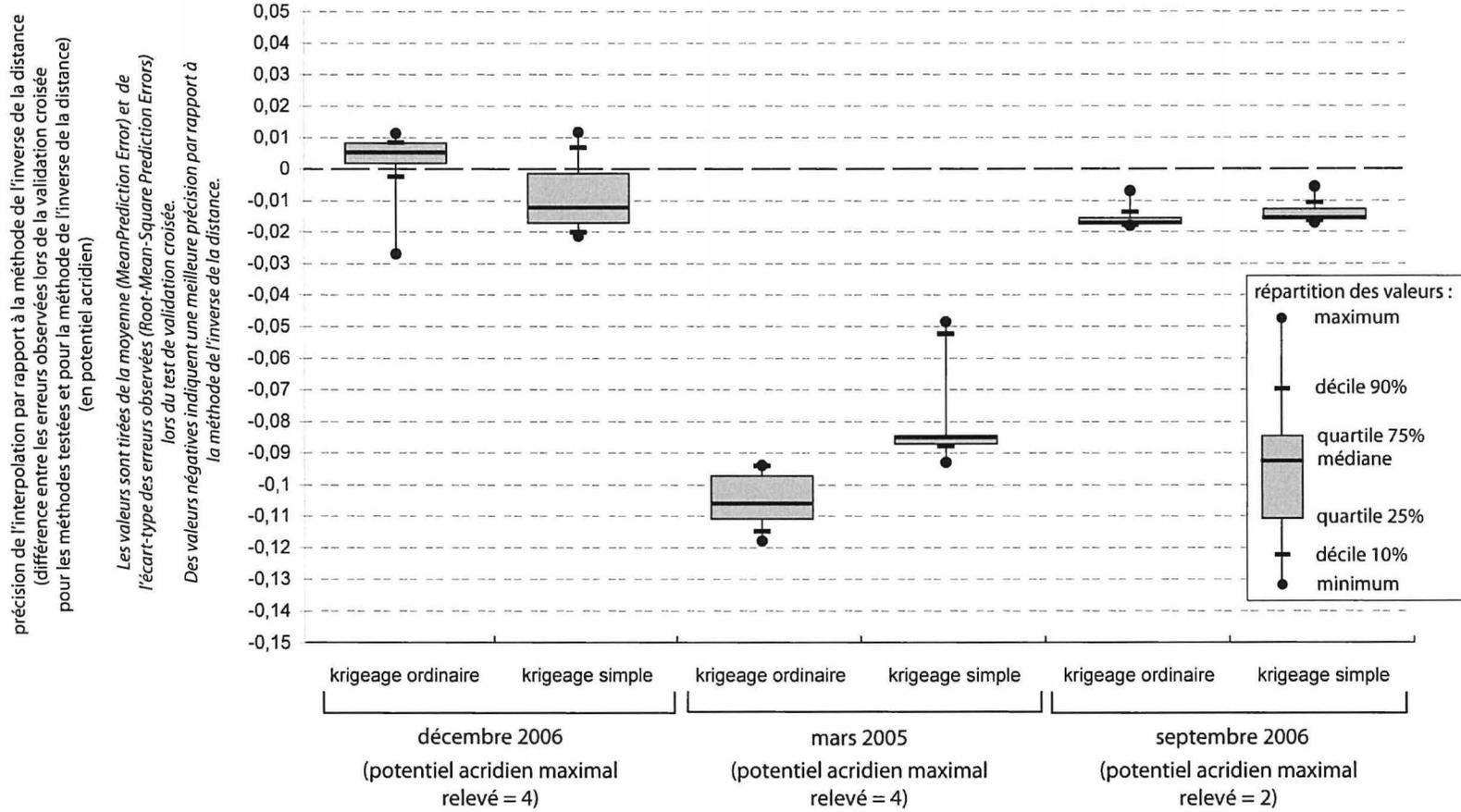
précision de l'interpolation par rapport à la méthode de l'inverse de la distance
(différence entre les erreurs observées lors de la validation croisée
pour les méthodes testées et pour la méthode de l'inverse de la distance)
(en potentiel acridien)

Les valeurs sont tirées de la moyenne (Mean Prediction Error) et de
l'écart-type des erreurs observées (Root-Mean-Square Prediction Errors)
lors du test de validation croisée.
Des valeurs négatives indiquent une meilleure précision par rapport à
la méthode de l'inverse de la distance.



Graphique 13 :

Interpolation des données acridiennes : précision observée pour chaque méthode, tous modèles variographiques confondus, sur chaque jeu de données testé, en comparaison de la précision observée pour la méthode de l'inverse de la distance.

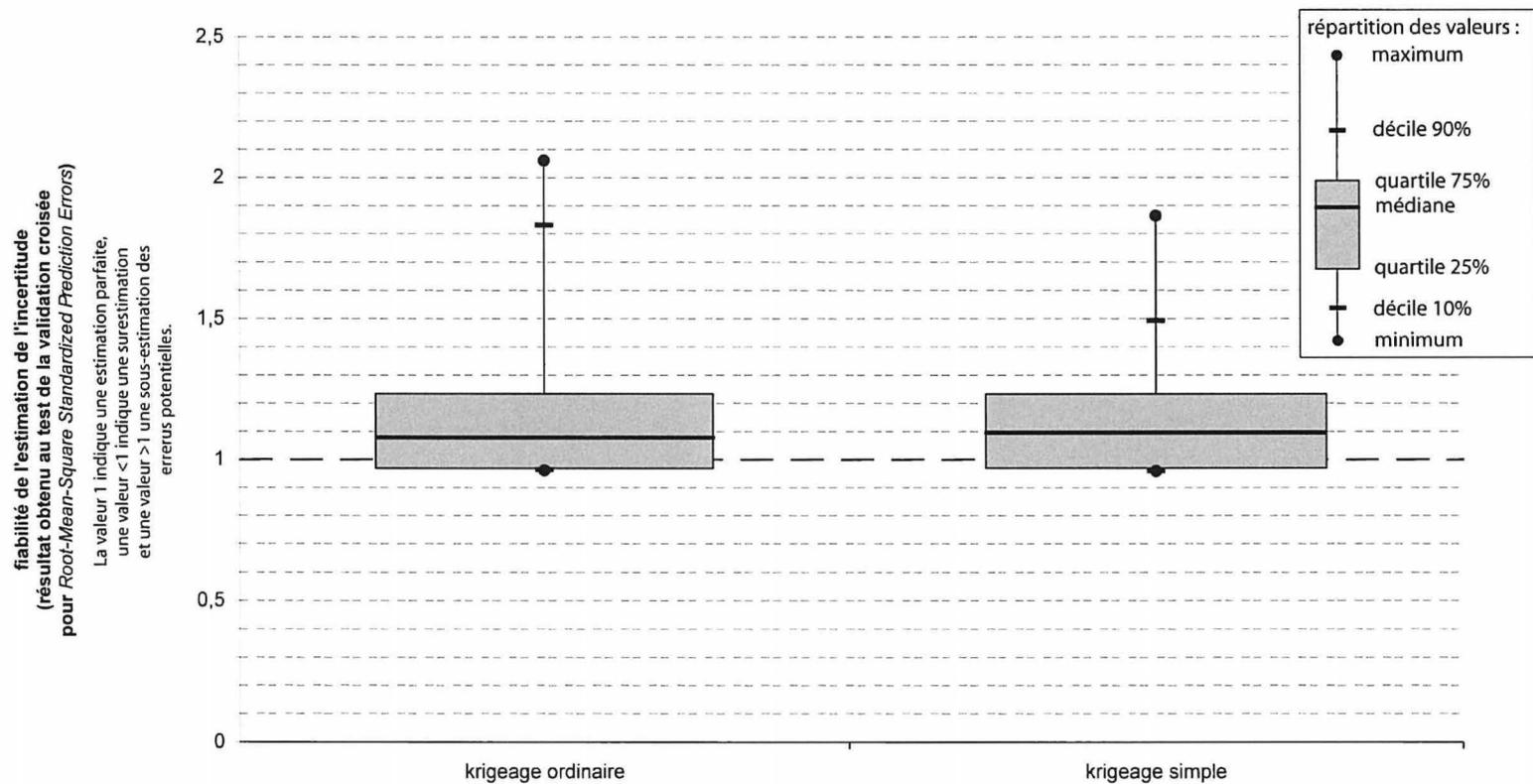


méthode de l'inverse de la distance :
 Mean Prediction Error + Root-Mean-Square Prediction Errors = 0,53 p.a.

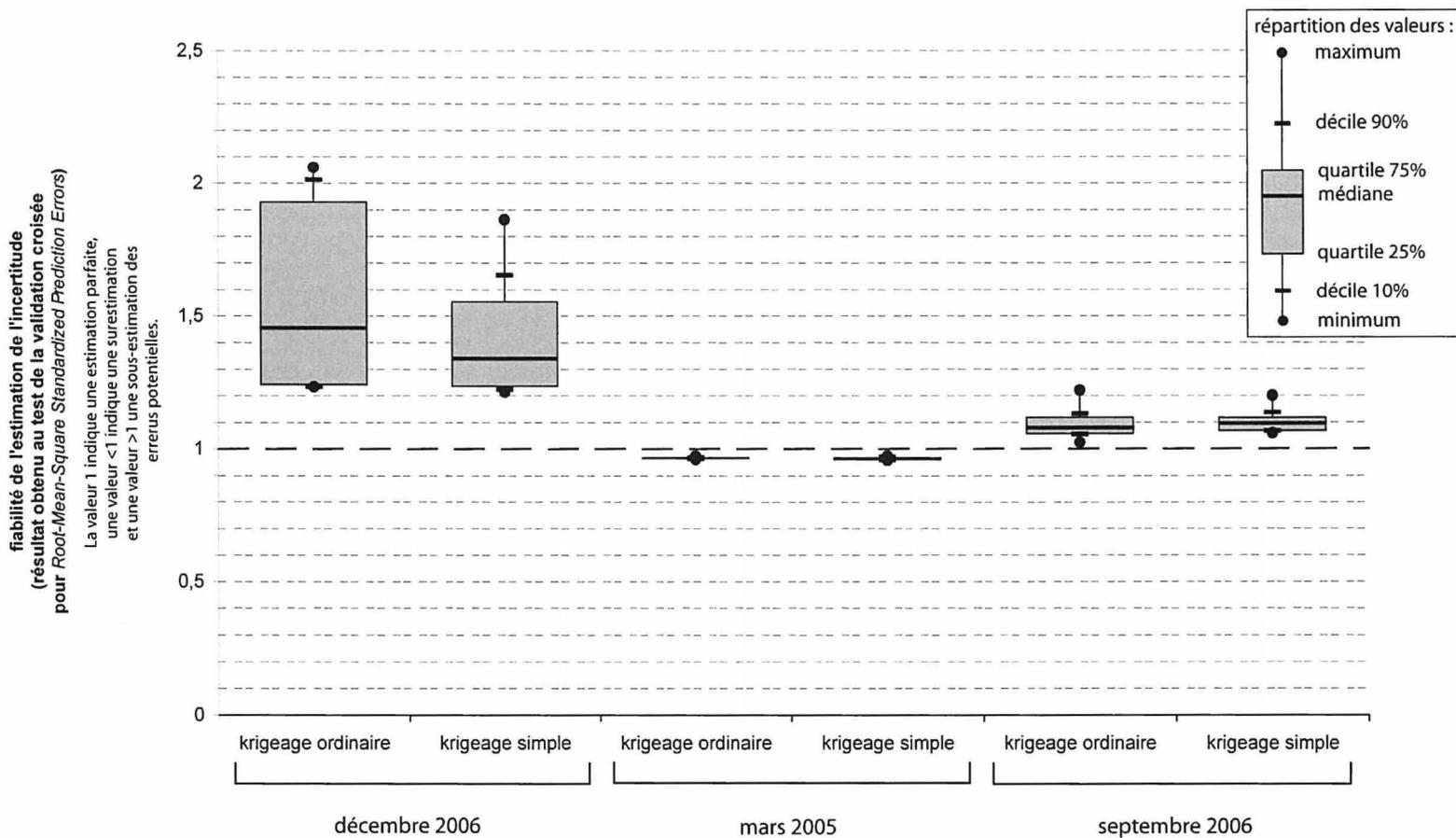
1,24 p.a.

0,36 p.a.

Graphique 14 : Interpolation des données acridiennes : fiabilité de l'estimation de l'incertitude pour chaque méthode, tous modèles variographiques confondus, sur l'ensemble des jeux de données testés.

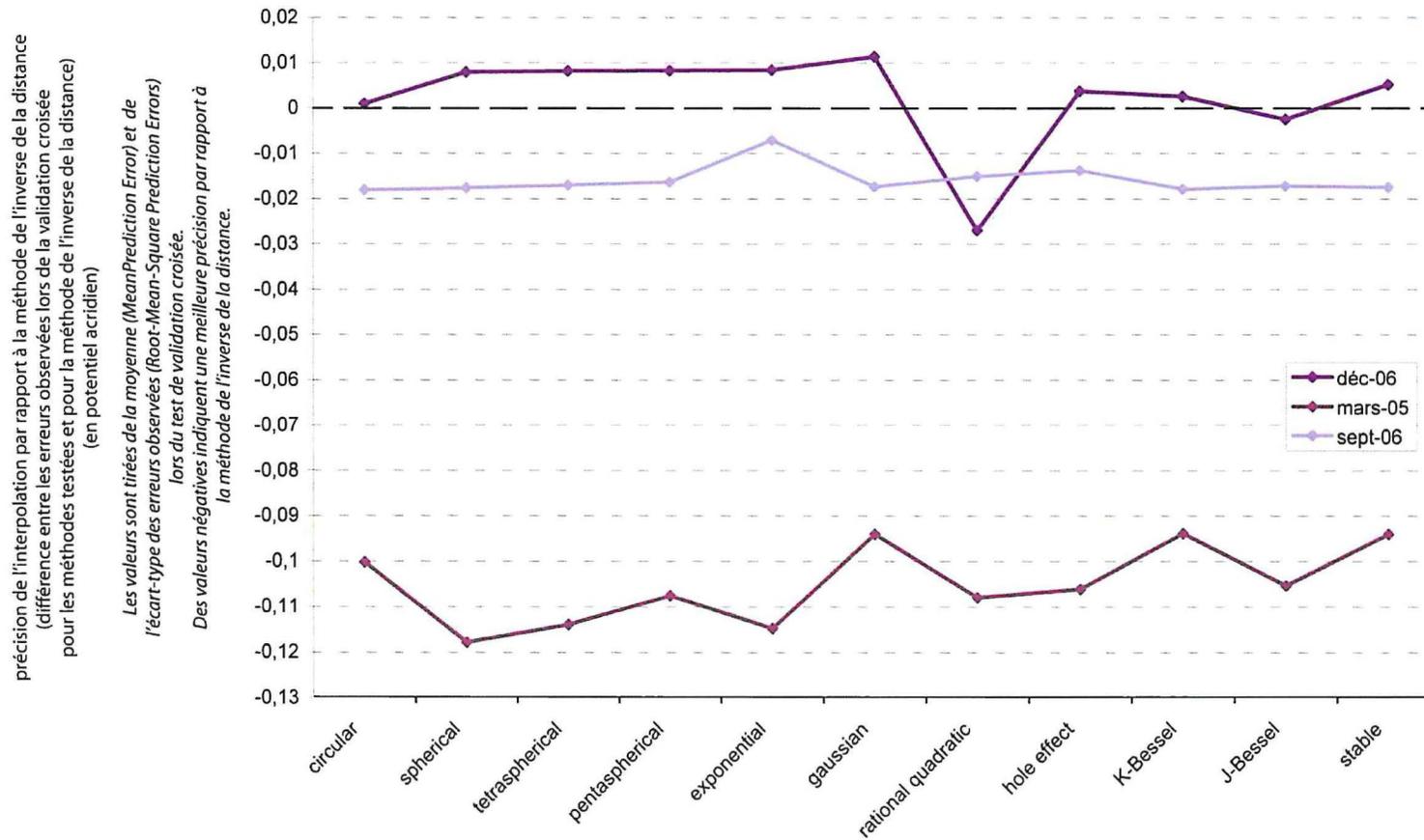


Graphique 15: Interpolation des données acridiennes : fiabilité de l'estimation de l'incertitude pour chaque méthode, tous modèles variographiques confondus, sur chaque jeu de données testé.



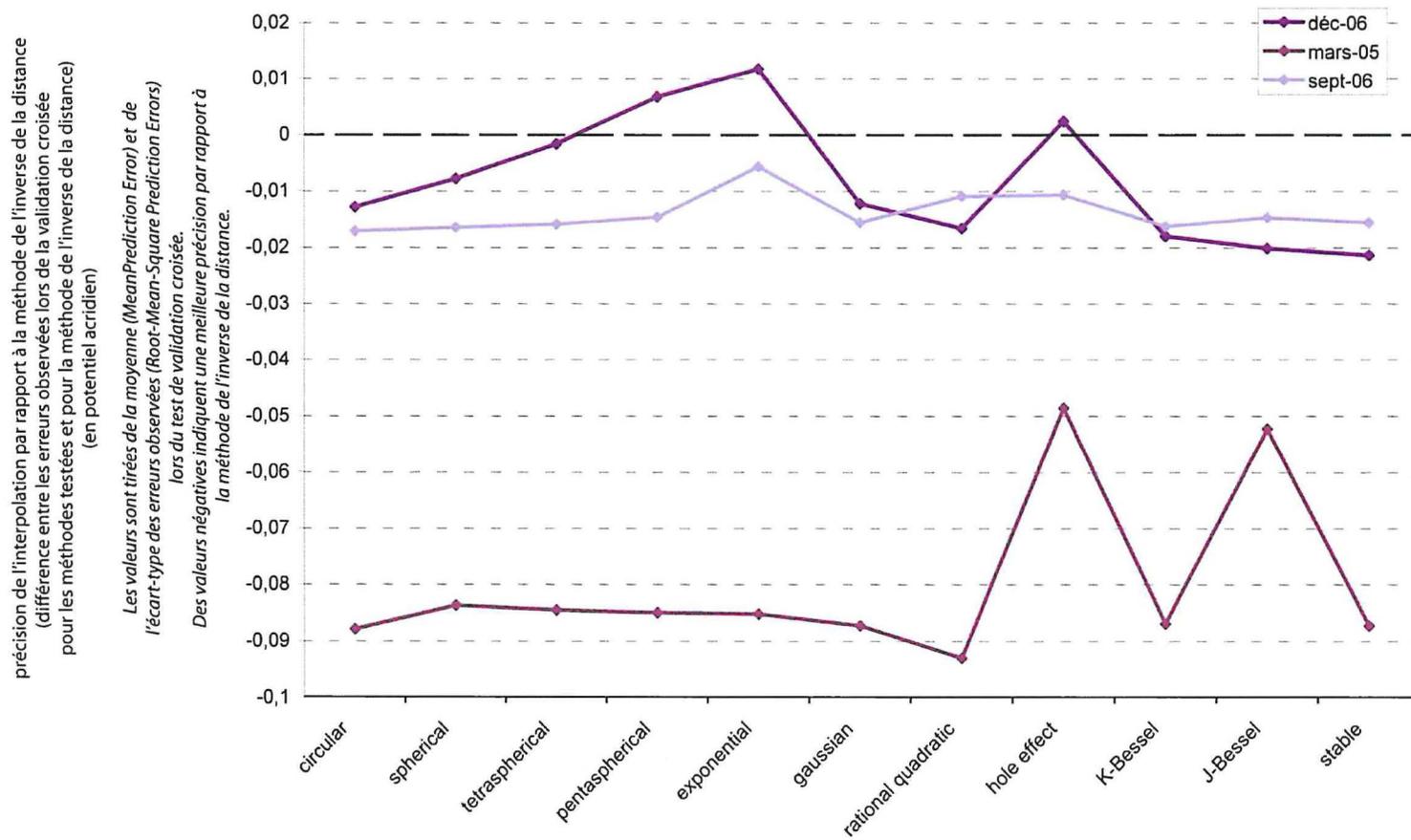
Graphique 16 :

Interpolation des données acridiennes : précision observée pour chaque modèle variographique, appliqué au krigeage ordinaire, sur chaque jeu de données testé, en comparaison de la précision observée pour la méthode de l'inverse de la distance.



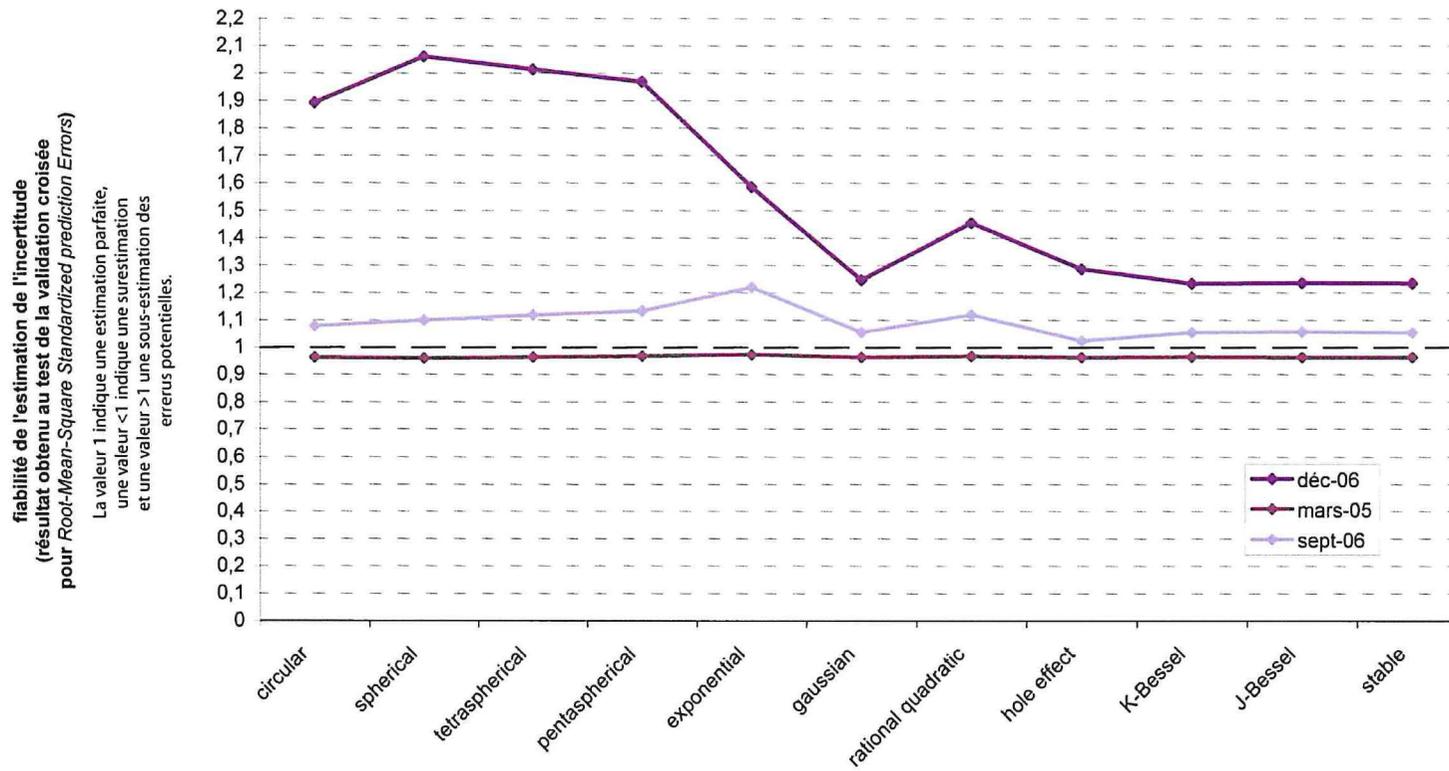
Graphique 17 :

Interpolation des données acridiennes : précision observée pour chaque modèle variographique, appliqué au krigeage simple, sur chaque jeu de données testé, en comparaison de la précision observée pour la méthode de l'inverse de la distance.



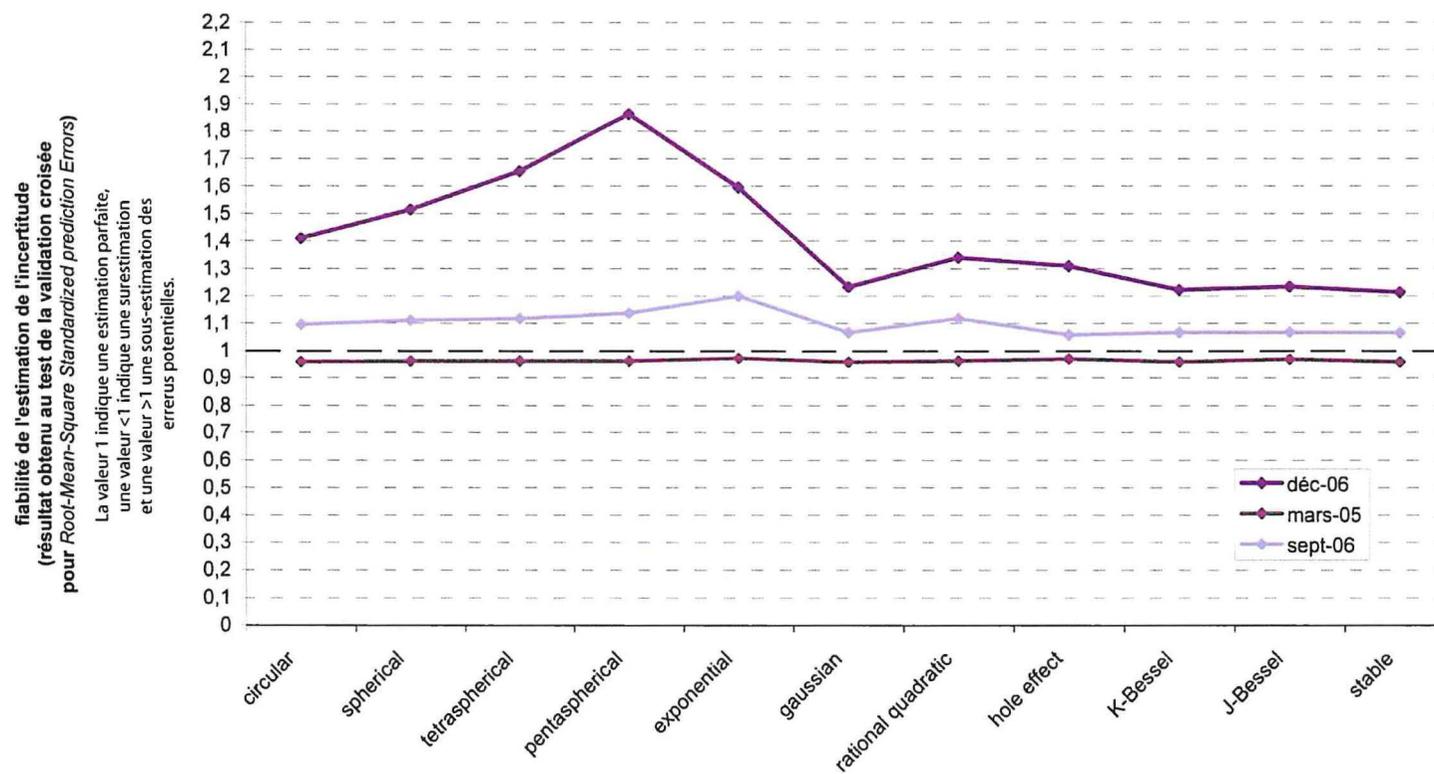
Graphique 18 :

Interpolation des données acridiennes : fiabilité de l'estimation de l'incertitude pour chaque modèle variographique, appliqué au krigeage ordinaire, sur chaque jeu de données testé.



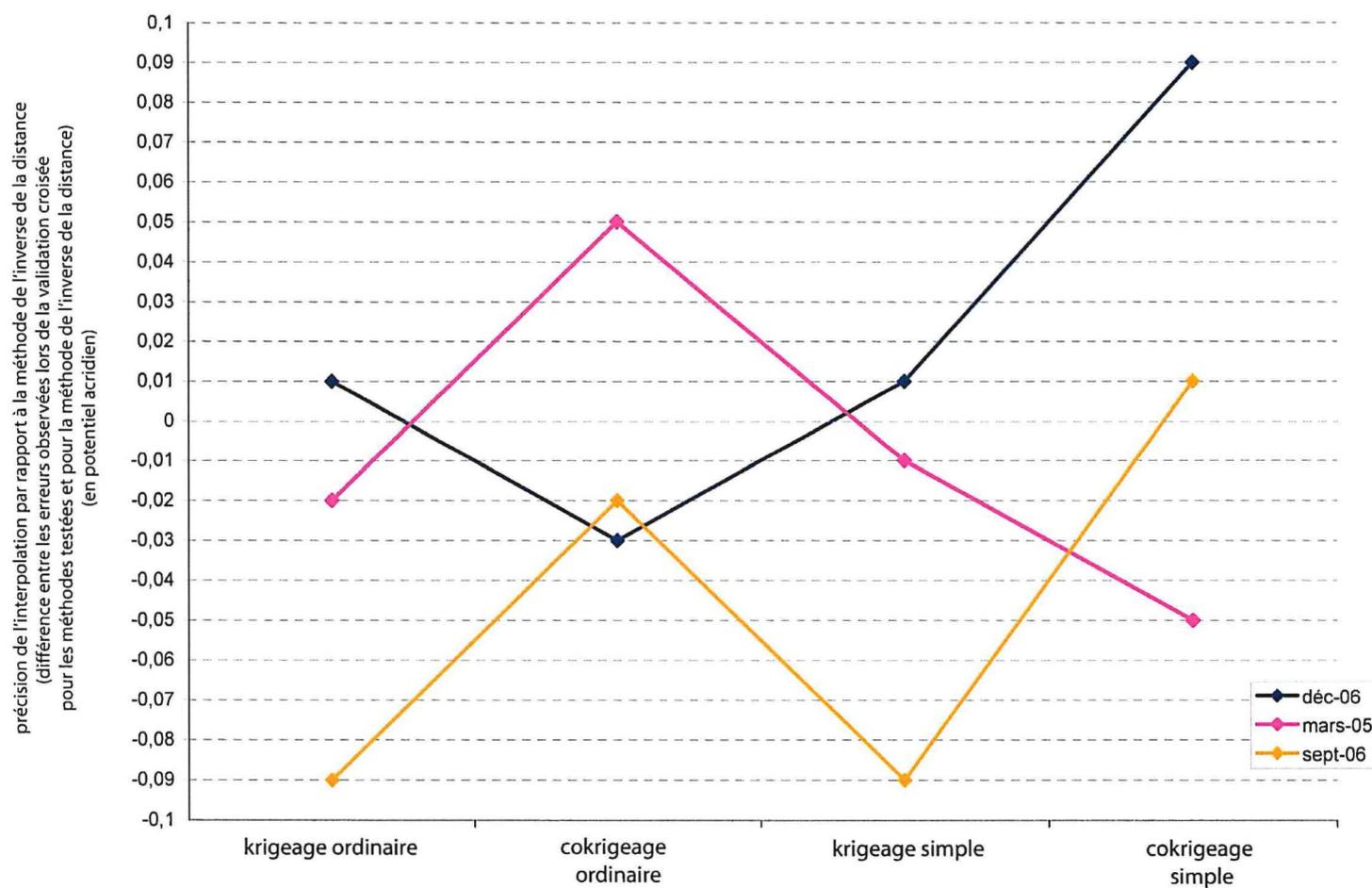
Graphique 19:

Interpolation des données acridiennes : fiabilité de l'estimation de l'incertitude pour chaque modèle variographique, appliqué au krigeage simple, sur chaque jeu de données testé.



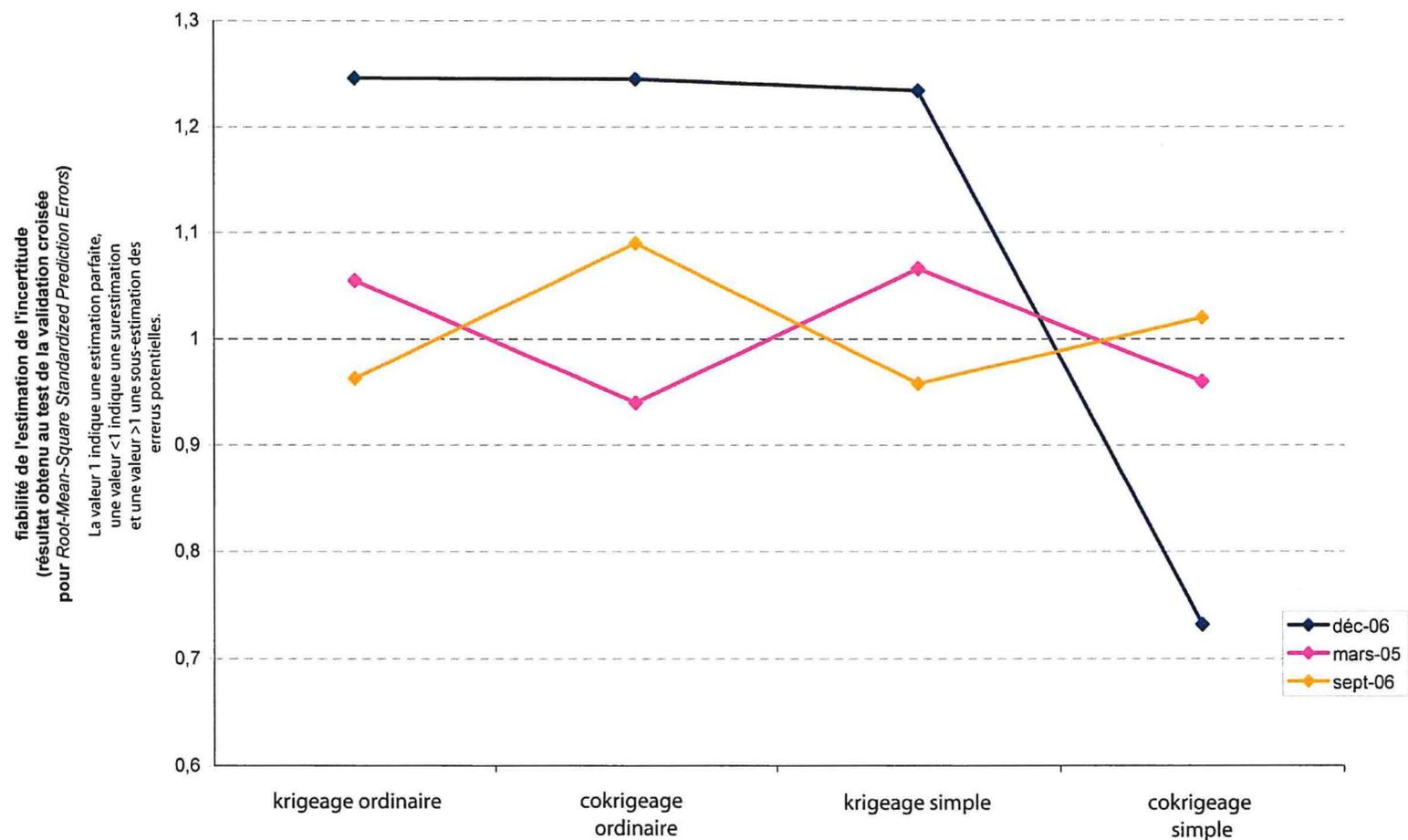
Graphique 20 : **Interpolation des données acridiennes : évaluation des performances du cokrigeage par rapport au krigeage à une seule variable, sur le plan de la précision des interpolations**

*La seconde variable dans le cas du cokrigeage consiste en la carte isohyète des moins concernés.
Les résultats présentés sont ceux obtenus avec le modèle variographique gaussien.*



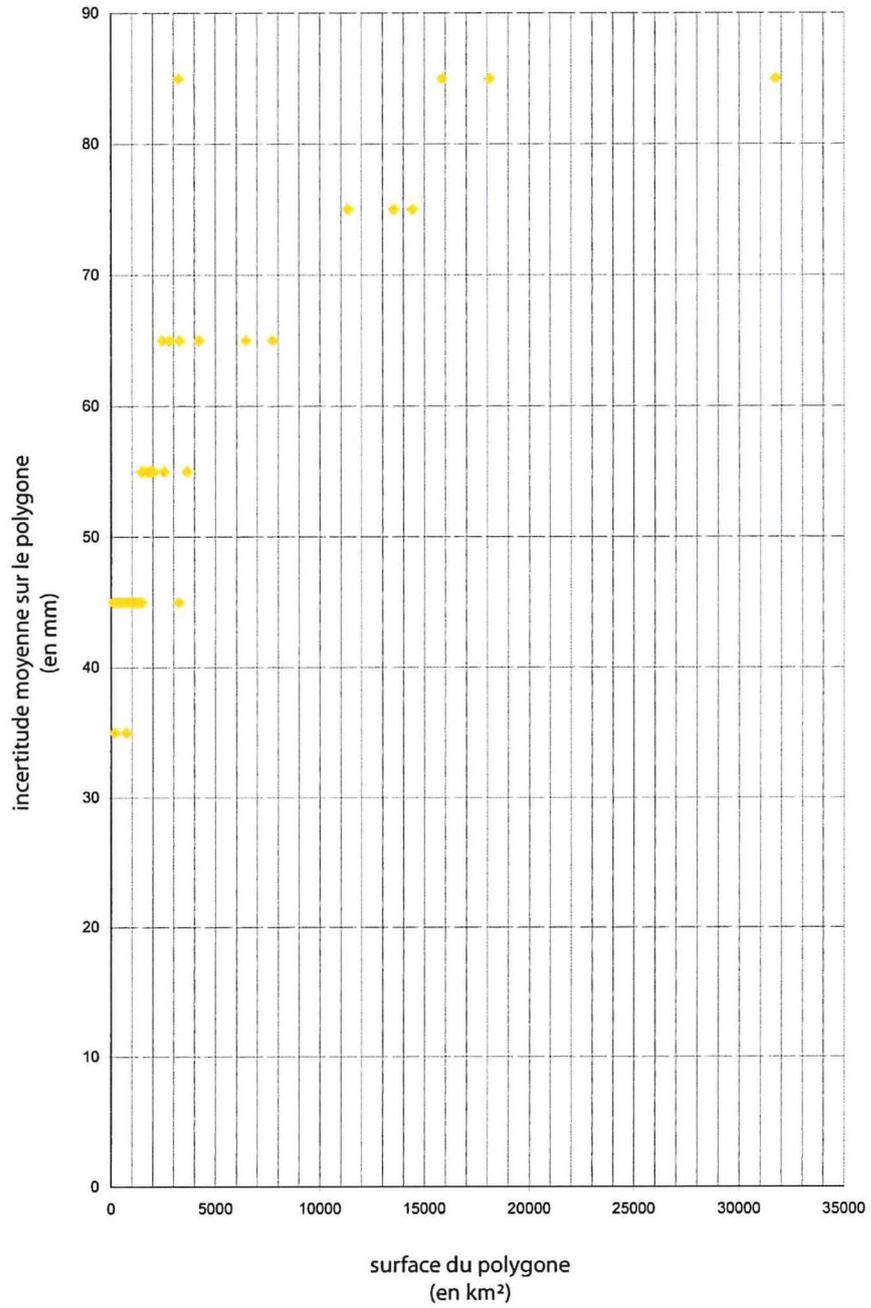
Graphique 21 : **Interpolation des données acridiennes : évaluation des performances du cokrigeage par rapport au krigeage à une seule variable, sur le plan de la fiabilité de l'estimation de l'incertitude**

*La seconde variable dans le cas du cokrigeage consiste en la carte isohyète des moins concernés.
Les résultats présentés sont ceux obtenus avec le modèle variographique gaussien.*

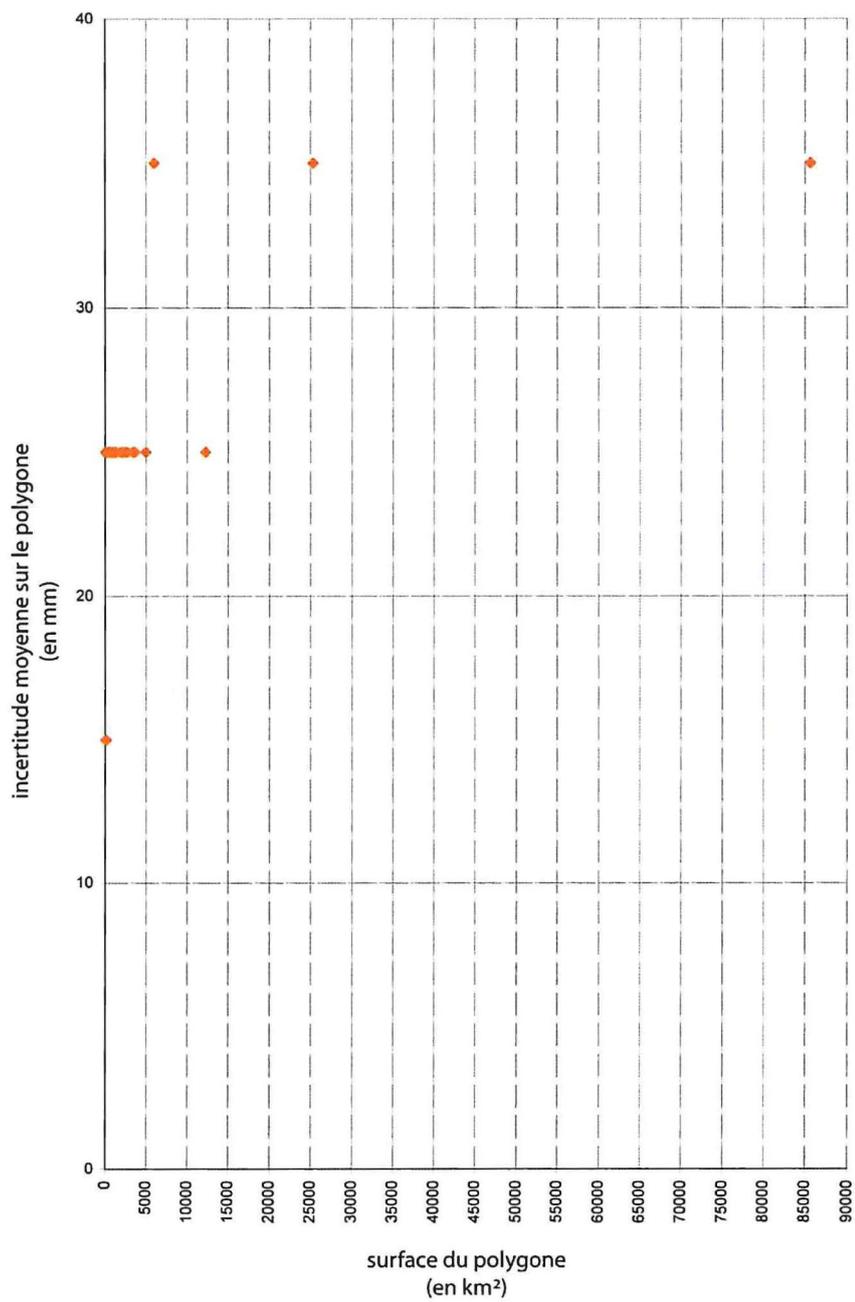


ANNEXE 5 : Graphiques utilisés pour la détermination d'un réseau minimal de collecte de l'information pluviométrique

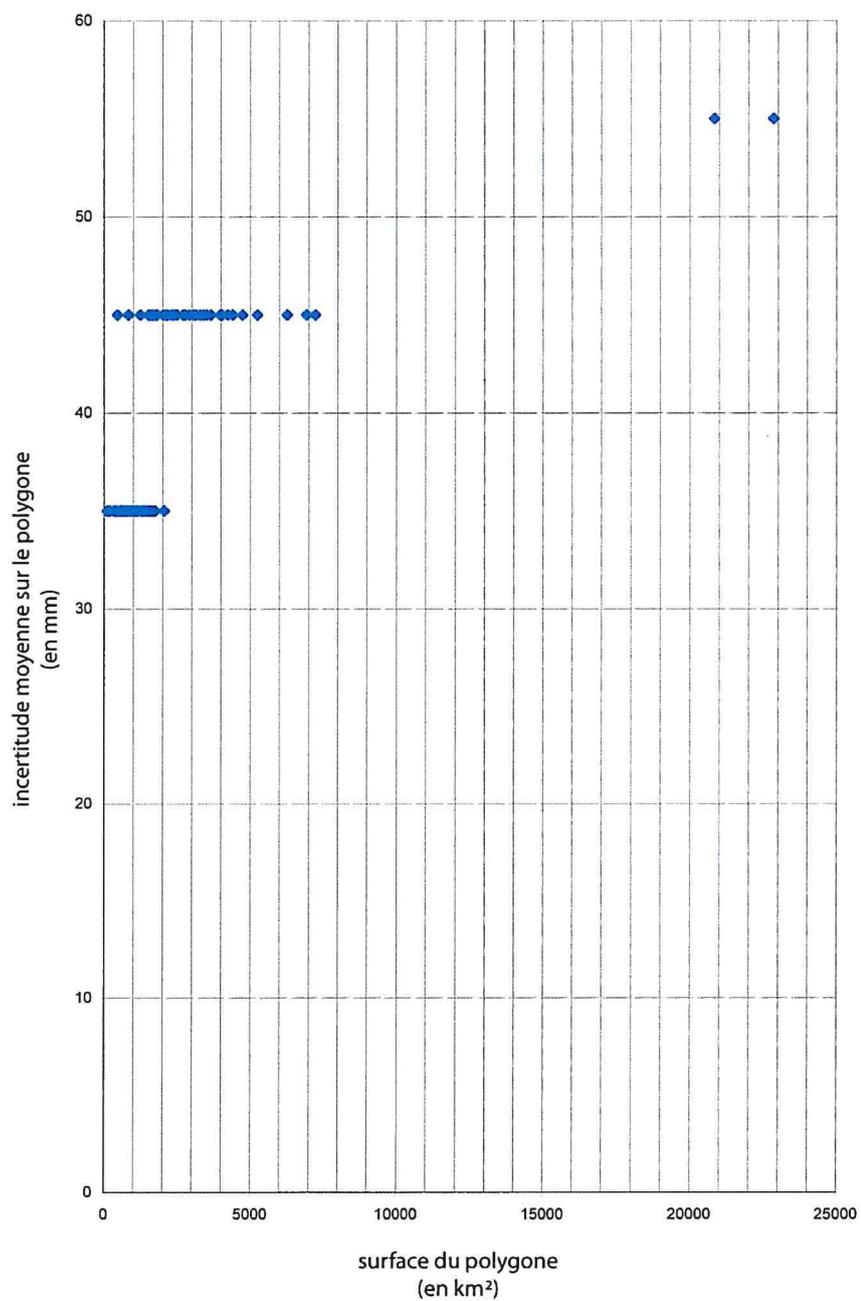
Graphique 23 : Relation entre surface et incertitude moyenne pour chaque polygone de Thiessen :
mois de mars 2005



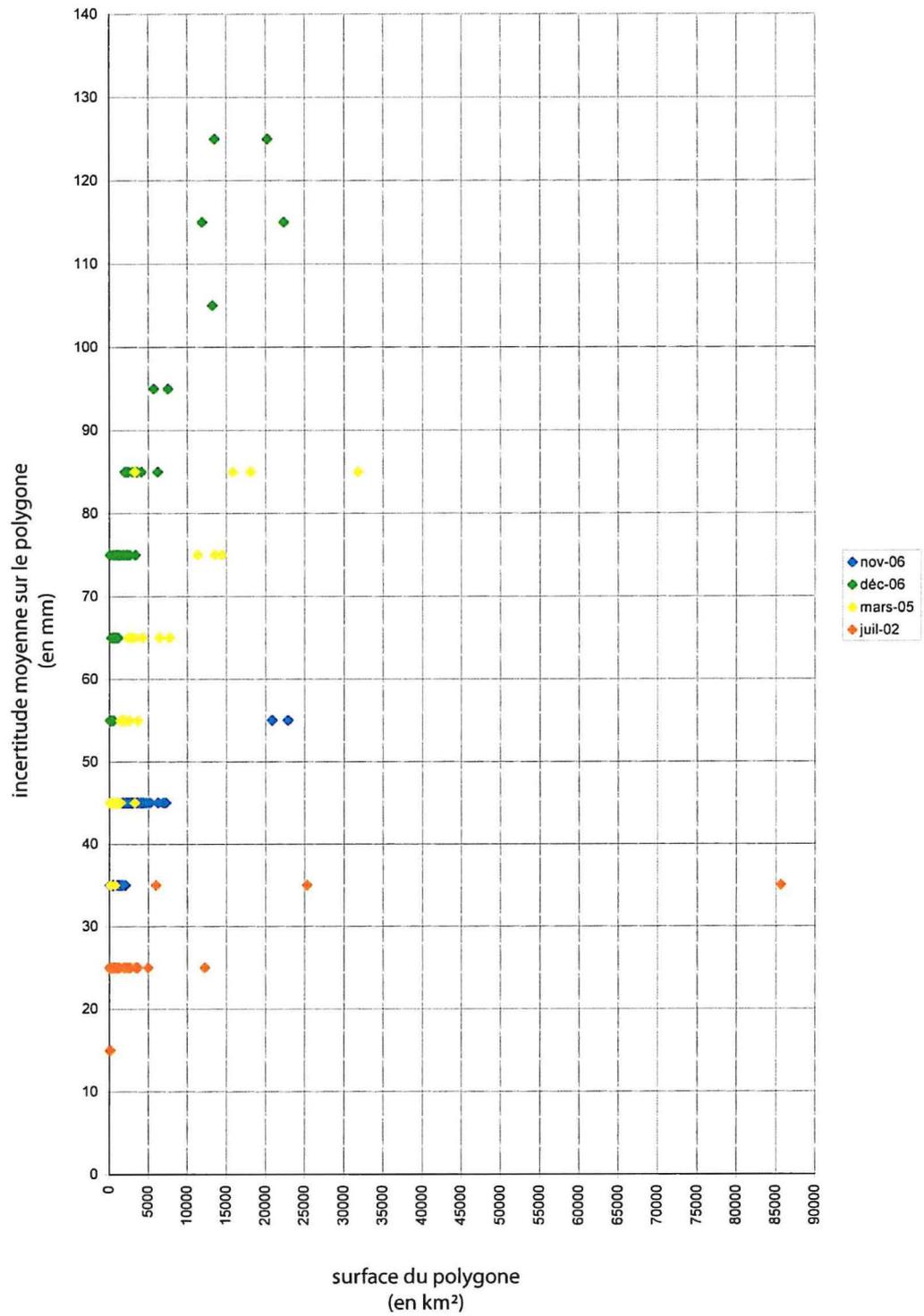
Graphique 24 : Relation entre surface et incertitude moyenne pour chaque polygone de Thiessen : mois de juillet 2002



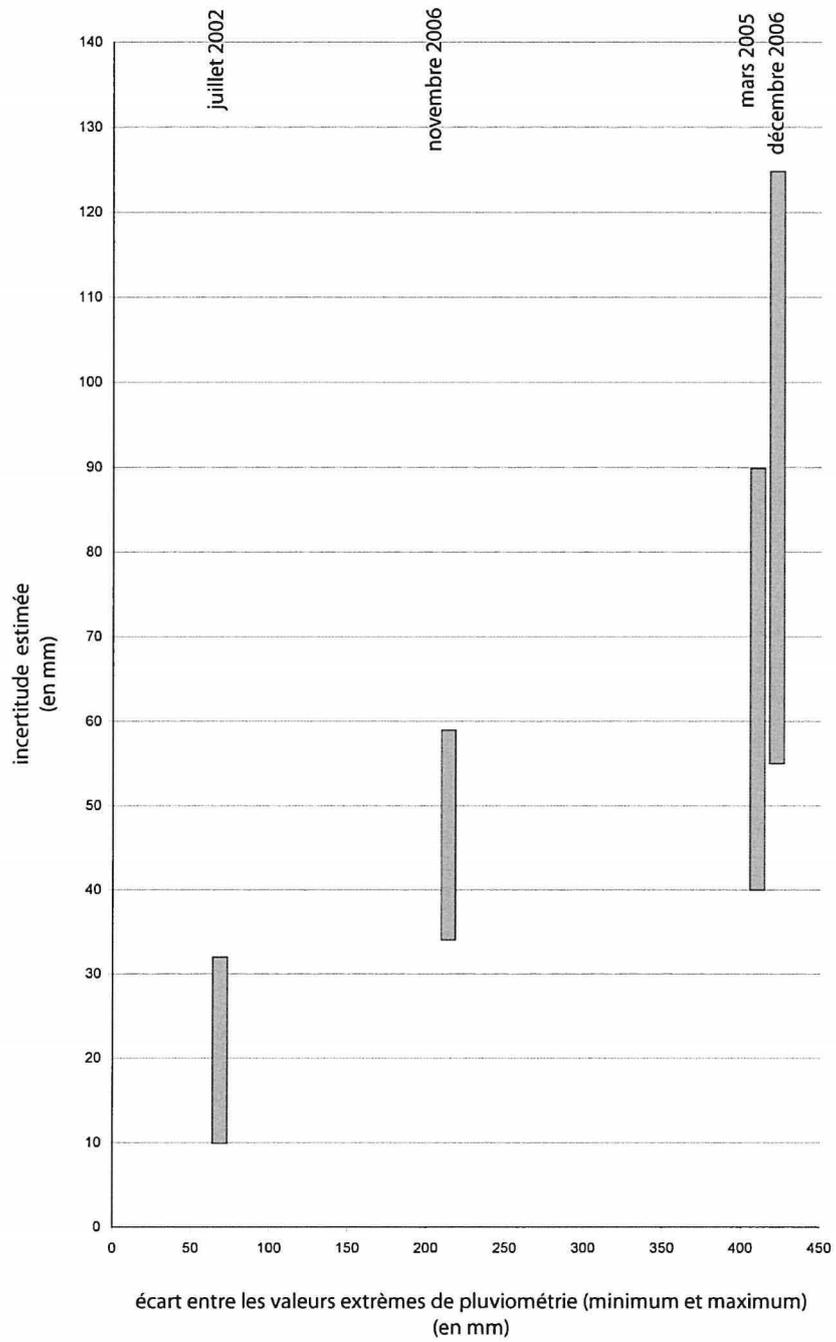
Graphique 25 : Relation entre surface et incertitude moyenne pour chaque polygone de Thiessen :
mois de novembre 2006



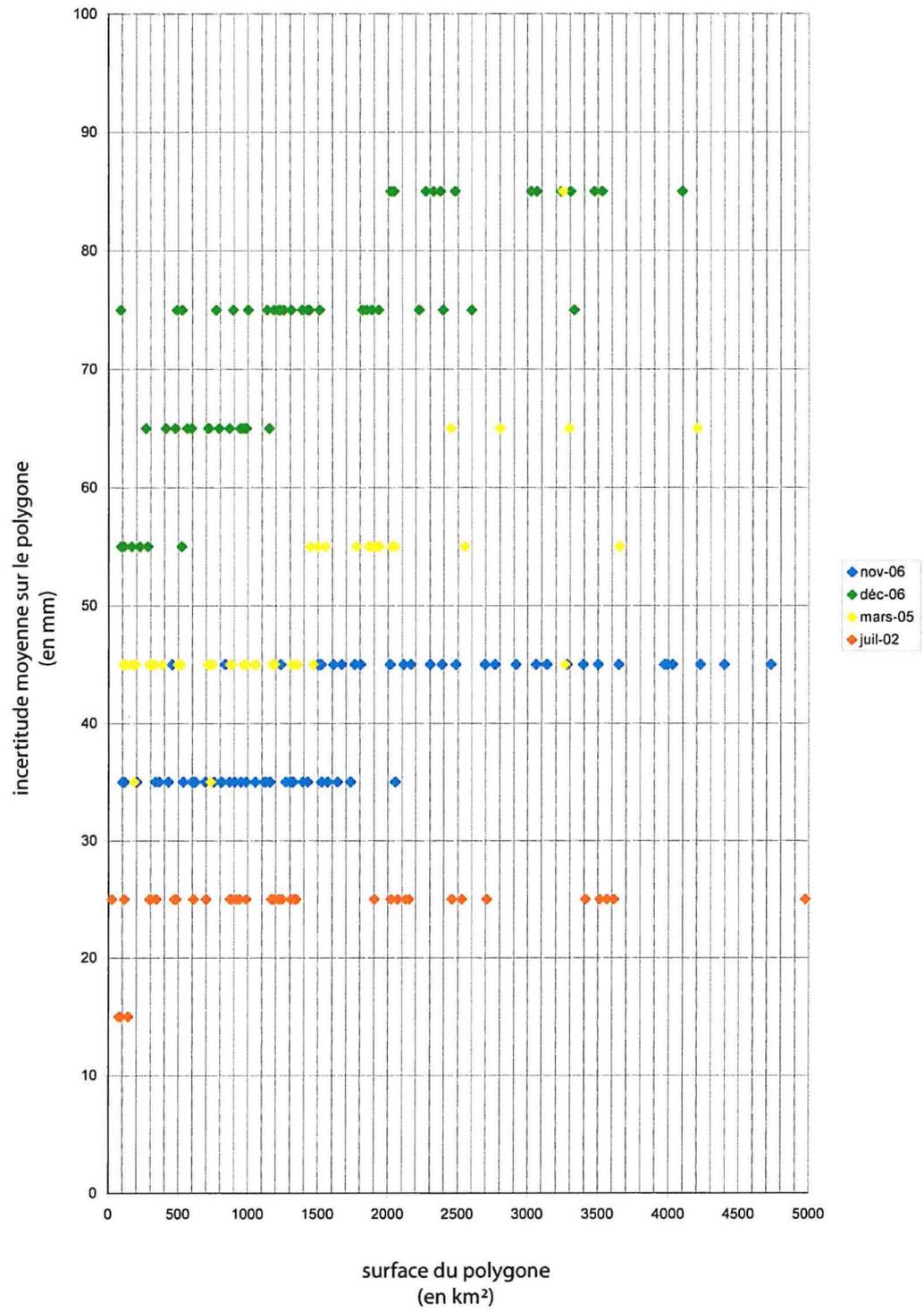
Graphique 26 : Relation entre surface et incertitude moyenne pour chaque polygone de Thiessen :
mois de novembre 2006, décembre 2006, mars 2005, et juillet 2002



Graphique 27 : Relation entre la variabilité des valeurs de pluviométrie et l'ampleur de l'incertitude associée à l'interpolation



Graphique 28 : Relation entre surface et incertitude moyenne pour chaque polygone de Thiessen :
 mois de novembre 2006, décembre 2006, mars 2005, et juillet 2002



ANNEXE 6 : Mode d'emploi pour l'outil QualitéDiagnostic

- Qu'est-ce que l'Outil Qualité Diagnostic ?

L'Outil Qualité Diagnostic est en réalité une « boîte à outil » (Toolbox). Les applications que cette « boîte à outil » contient visent à renseigner sur la qualité et la fiabilité du diagnostic de risque établi par le SIG d'Alerte précoce pour les pullulations du criquet migrateur.

Trois applications sont regroupées au sein de la « boîte à outil » :

- l'outil « **AuditDonnees** »
- l'outil « **CartesIncertitude** »
- l'outil « **FinalisationCartesIncertitude** »

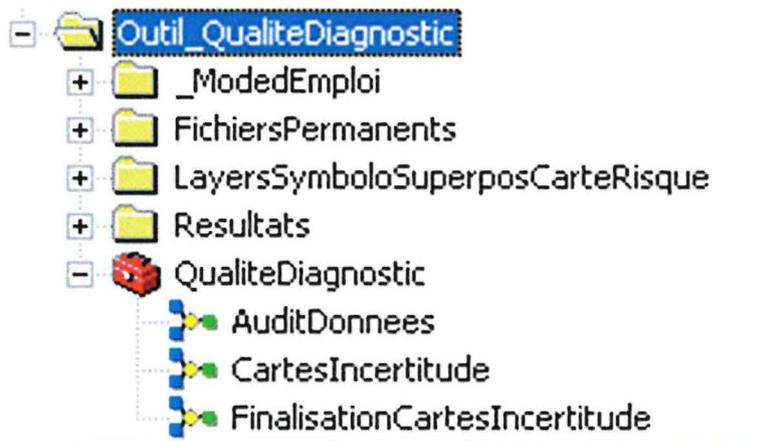
L'utilisation se fait dans ArcCatalog. Les outils peuvent être lancés depuis le menu général d'ArcCatalog (arborescence) par double click sur l'icône de l'outil.

L'outil est constitué en plus de la boîte à outils proprement dite de différents dossiers et fichiers. En premier lieu il s'agit des fichiers permanents qui renferment les fichiers utilisés pour produire le décompte des besoins minimaux remplis (voir par exemple pour des opérations de jointure spatiale), pour affecter les paramétrages nécessaires à la production des cartes d'incertitude, ou pour réaliser des opérations de type découpage.

Les fichiers permanents sont placés dans le dossier « FichiersPermanents ». Les résultats sont enregistrés dans le dossier « Resultats ». Le mode d'emploi est placé dans le dossier « ModedEmploi ». Il existe enfin un dossier « LayersSymboloSuperposCarteRisque » qui contient des layers stockant une symbologie de référence pour chaque carte d'incertitude (pluviométrique et acridienne) afin de pouvoir superposer celles-ci à la carte de risque.

Pour les outils « AuditDonnees » et « CartesIncertitude » les fichiers traités (en entrée) sont les tables créées lors des requêtes au sein des bases de données CNA (météorologique et acridienne) : il s'agit des tables « **Pluvio_demandee** » et « **Pot_acrido_tempo** » qui sont enregistrées à chaque requête dans les bases de données dites « **BD_mto_tempo** » et « **BD_acrido_tempo** ». Pour l'outil « FinalisationCartesIncertitude » les fichiers traités en entrée doivent être des Geostatistical Analyst Layers (ceux créés par l'outil « CartesIncertitude » ou tout autre fichier dérivé de ceux-ci tant qu'il se trouve au format Geostatistical Analyst Layer). L'emplacement des fichiers d'entrée n'est pas un problème pour le fonctionnement des outils car la fenêtre de démarrage permet de les localiser.

Attention ! : Pour utiliser ces outils il est nécessaire de disposer de la version 9.2 du logiciel ArcGIS. Les outils « CartesIncertitude » et « FinalisationCartesIncertitude » nécessitent par ailleurs l'extension « Geostatistical Analyst ».



L'outil « AuditDonnees »

L'outil « AuditDonnees » calcule la quantité des données d'entrée fournies pour la réalisation des couches d'information pluviométrique et acridienne, et compare le résultat aux valeurs de références établies comme besoins minimaux. En deçà des besoins minimaux, les données d'entrée fournies sont trop peu nombreuses pour garantir la fiabilité du diagnostic de risque établi.

Il s'inscrit dans le principe d'Indicateurs Objectivement Vérifiables (IOV). Les résultats sont donnés pour chaque thématique (pluviométrie, prospections acridiennes). Les données pluviométriques sont traitées à l'échelle de l'ensemble de l'aire grégarigène tandis que les données acridiennes sont traitées à l'échelle de chaque secteur acridien.

Les résultats sont présentés sous forme de tables visualisables et exploitables sous ArcCatalog, ArcMap, Microsoft Office Access, Microsoft Office Excel. Elles peuvent être ajoutées à la carte sous ArcMap. Les résultats sont enregistrés dans la Geodatabase (afin de pouvoir être exploités sous Access sans manipulation préalable) « GDB_Resultats_AuditDonnes » au sein du dossier « Resultats ».

L'outil « CartesIncertitude »

L'outil « CartesIncertitude » permet de produire des cartes d'incertitude sans passer par le Geostatistical Wizard.

Les résultats sont enregistrés dans le dossier « Resultats ». Il s'agit de layers du type Geostatistical Analyst Layer (les classes utilisées dans la symbologie peuvent être manipulées).

Attention ! : l'étendue (extent) et la symbologie (classes de valeurs et couleurs de représentation) des layers devront être déterminées manuellement. Cette étape est importante. Il est présenté plus loin comment le réaliser.

L'outil « FinalisationCartesIncertitude »

L'outil « FinalisationCartesIncertitude » permet de découper le Geostatistical Analyst Layer créé selon les limites de l'aire grégarigène et de l'exporter au format Shapefile.

Un nom par défaut est affecté aux résultats mais peut être déterminé lors du lancement du processus (fenêtre de lancement) (afin par exemple de faire apparaître la date du mois concerné).

- Installation

Il n'y a pas d'installation nécessaire. Il suffit de copier/coller l'ensemble du dossier fourni à l'emplacement désiré.

Il est possible mais non nécessaire de placer la boîte à outil (fichier .tbx) au sein du menu ArcToolbox. Pour ce faire : click droit sur ArcToolbox, puis click « Add Toolbox », puis pointer la boîte à outil QualiteDiagnostic puis click « Open ».

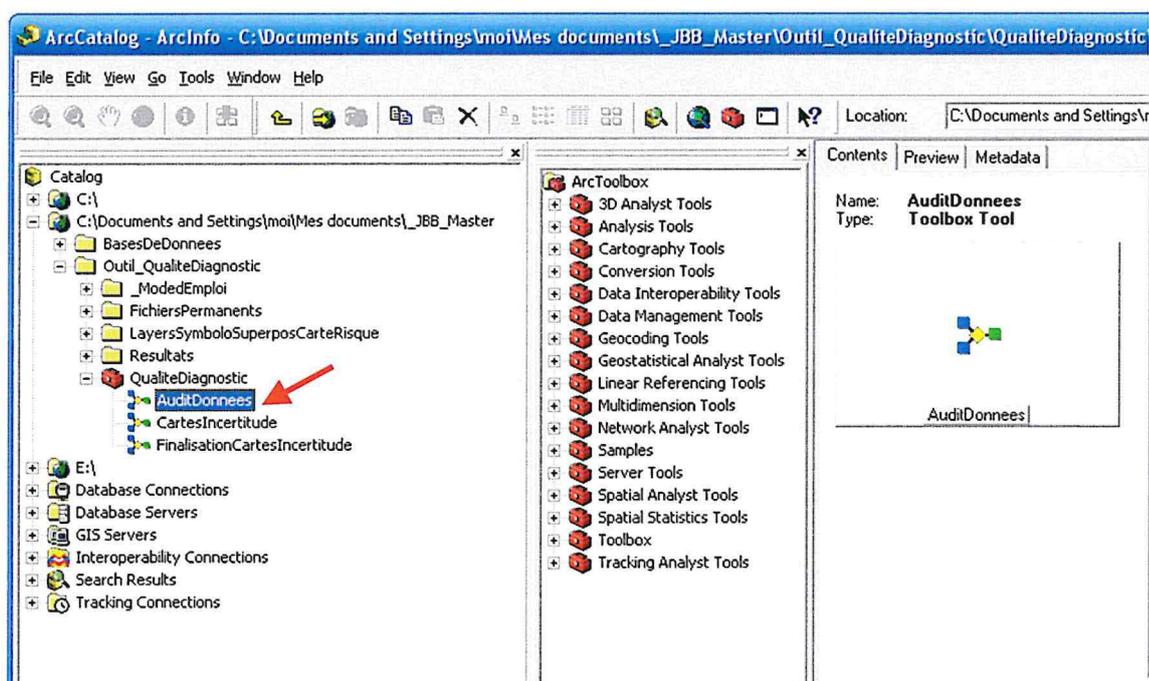
Attention ! : il est impératif de conserver l'ensemble des fichiers et dossiers fournis à l'intérieur du même dossier (« Outil_Qualitediagnostic »), ainsi que de conserver l'intégralité de ces fichiers, leur organisation, et les noms des fichiers permanents.

- Utilisation

L'utilisation se fait dans ArcCatalog. Les outils peuvent être lancés depuis le menu général d'ArcCatalog (arborescence).

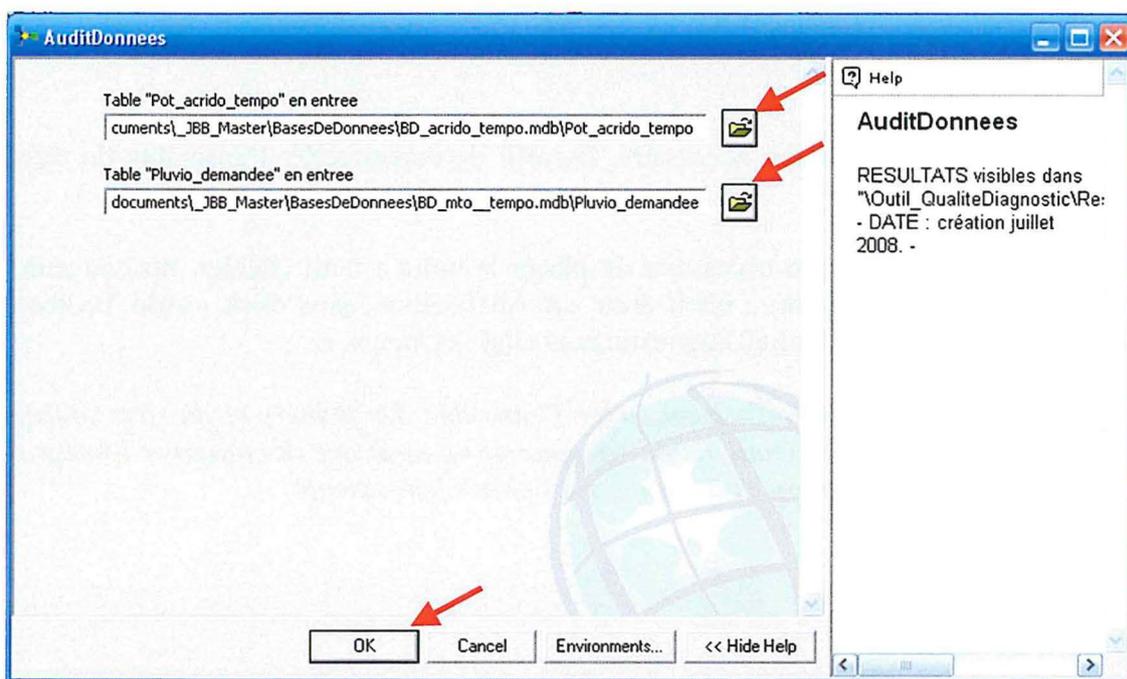
Étapes :

1/ **double click sur l'icône** de l'application (« AuditDonnees », « CartesIncertitude », « FinalisationCartesIncertitude ») (ou **click droit/open**).



2/ localiser les fichiers d'entrée (si nécessaire) ; puis click « OK ».

Note : L'outil « FinalisationCartesIncertitude » permet de remplacer le nom et l'emplacement attribués par défaut pour les résultats : procéder de la même manière que pour choisir localiser les fichiers d'entrée (click sur l'icône « dossier ») puis choisir l'emplacement et taper le nom souhaité pour le fichier.



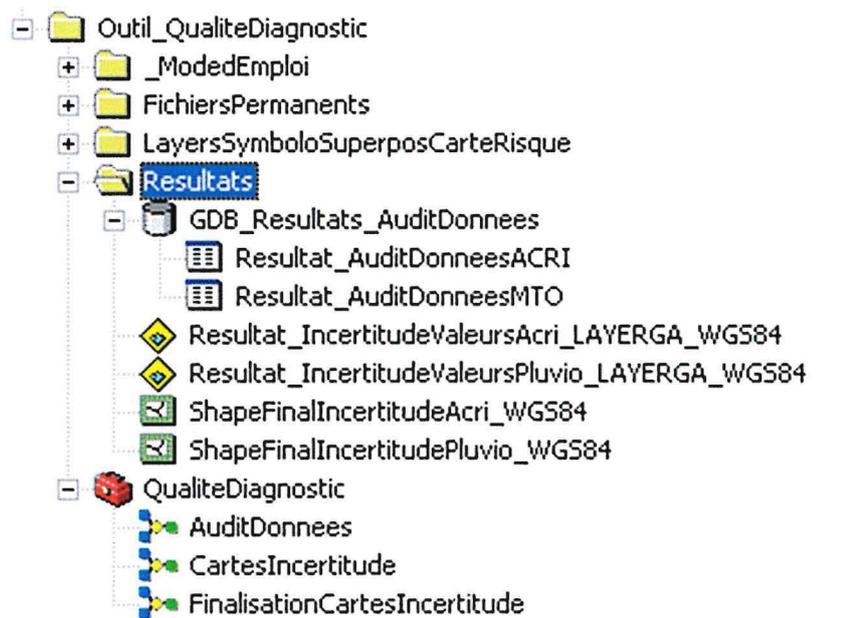
- Résultats

Les résultats sont stockés dans le dossier « Resultats ». Ils peuvent ensuite être renommés et manipulés.

Attention ! : dans le cas des outils « AuditDonnees » et « CartesIncertitude » les résultats précédents seront écrasés. Dans le cas de l'outil « FinalisationCartesIncertitude » les anciens résultats doivent par contre être supprimés ou renommés avant le lancement de l'application.

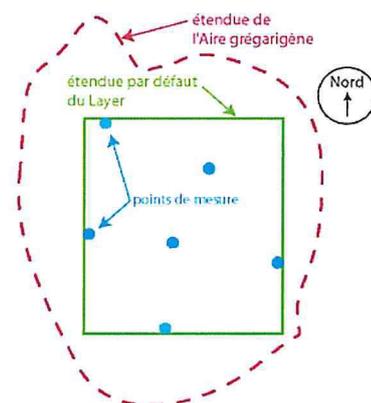
Attention ! : les Geostatistical Analyst Layers créés avec l'outil « CartesIncertitude » seront affectés par toute modification des tables sources « Pluvio_demandee » et « Pot_acrido_tempo » (nouvelles requêtes dans les bases de données). Pour les conserver il faut donc les enregistrer sous un autre nom ou utiliser l'outil « FinalisationCartesIncertitude » pour les exporter au format Shapefile avant de créer de nouvelles tables « Pluvio_demandee » et « Pot_acrido_tempo »

Note : les Geostatistical Analyst Layers et les shapefiles sont établis avec le système de coordonnées WGS 1984.



- Manipulations nécessaires des Geostatistical Analyst Layers « Resultat_IncertitudeValeursPluvio », et « ..._IncertitudeValeursAcric »

Les Geostatistical Analyst Layers produit par l’outil « CartesIncertitude » doivent être manipulés manuellement pour pouvoir leur affecter la **symbologie** désirée (classes de valeurs et code couleur) et pour régler leur **étendue** (*extent*) c’est-à-dire pour disposer d’une carte d’incertitude concernant l’ensemble de l’Aire grégorigène (le layer produit est, par défaut, borné dans les limites des points de mesure aux coordonnées les plus extrêmes).



Pour régler la symbologie :

Click droit sur le Layer / **Propriétés** / onglet **Symbologie**

Attention : Pour pouvoir affecter des classes de valeurs s’étendant en-deçà ou au-delà des valeurs minimales et maximales contenues dans le layer (par exemple 0mm d’incertitude, >100mm d’incertitude) (permettant ainsi d’obtenir une symbologie homogène et des cartes comparables quel que soit le jeu de données) il faut cocher l’option « **Custom min et max** » dans l’onglet « Symbologie »

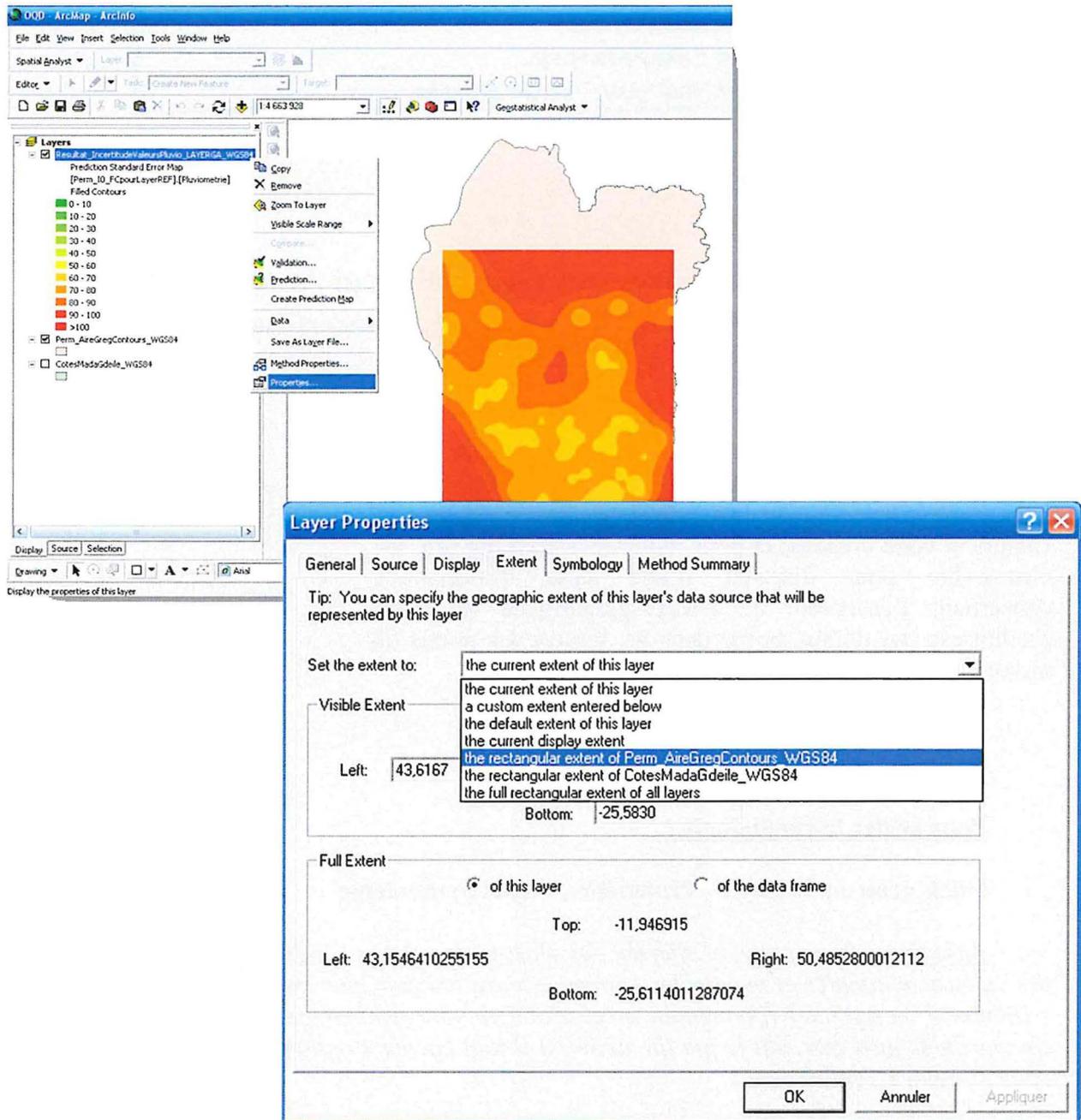
Pour régler l'étendue (extent) de façon à disposer d'une surface concernant l'ensemble de l'aire grégarigène :

Ouvrir dans ArcMap :

- le Geostatistical Analyst Layer « Resultat_IncertitudeValeurs... »
- et un Shapefile ou FeatureClass de l'aire grégarigène (par exemple dans « GDB_FichiersPermanents » la FeatureClass « Perm_AireGregContours_WGS84 »)

puis

- **Click droit** sur le Geostatistical Analyst Layer / **Properties** / onglet « *Extent* »
- puis pointer le **menu déroulant** « *Set the extent* » to et choisir « **the rectangular extent of Perm_AireGregContours_WGS84** »



L'étendue du layer recouvre alors l'ensemble de la surface souhaitée (aire grégarigène), mais elle est toujours rectangulaire. Deux procédures sont alors possibles pour découper la surface interpolée selon les limites souhaitées :

- utiliser l'outil « **FinalisationCartesIncertitude** » qui permet d'exporter le layer au format Shapefile et de découper celui-ci selon les contours de l'aire grégarigène ;
- ou **click droit sur « couches »** (« **layers** » pour la version anglaise) de l'arborescence d'ArcMap / **Properties** / onglet « **Data Frame** » / valider « **Clip to Shape** », et choisir les limites de référence (par exemple « AireGregarigene ») avec le bouton « **Specify shape** ». *Attention ! : cette procédure découpe toutes les couches selon les limites fixées.*

Attention ! : il est préférable d'utiliser l'outil « FinalisationCartesIncertitude » car la deuxième procédure pose des problèmes pour un export ultérieur vers le format Shapefile (les contours de l'aire grégarigène sont ajoutés comme polygones supplémentaires avec pour attributs les valeurs minimales définies dans la symbologie, ce qui aura alors des conséquences pour des calculs de surfaces concernées par une incertitude donnée).

