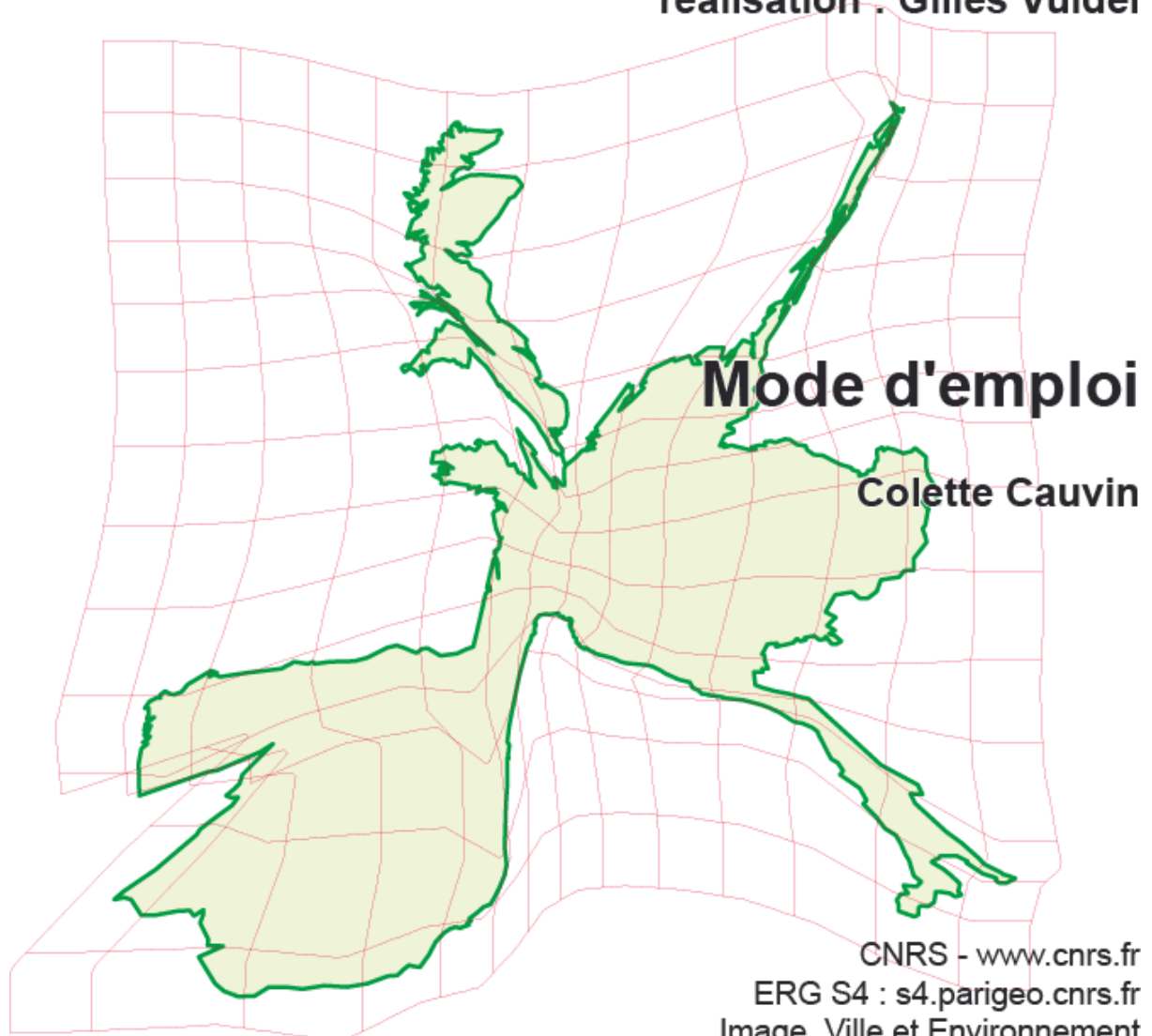


Logiciel de comparaison spatiale

Darcy 2.0

**d'après les travaux originaux
de Waldo Tobler**

réalisation : Gilles Vuidel



CNRS - www.cnrs.fr
ERG S4 : s4.parigeo.cnrs.fr
Image, Ville et Environnement
imaville.u-strasbg.fr

Paris, Besançon, Strasbourg
2009

Introduction

Le logiciel Darcy permet d'appliquer une méthode de comparaison spatiale, dérivée des travaux de W. d'Arcy Thompson [1917, 1948], conçue par W. Tobler [1965-1977]. Cette méthode, dénommée « régression bidimensionnelle », autorise la comparaison de deux surfaces distinctes (figure 1) – une surface source [**Z**] et une surface image [**W**] – déterminées par des points homologues définis respectivement par les coordonnées [**XY**] et [**UV**].

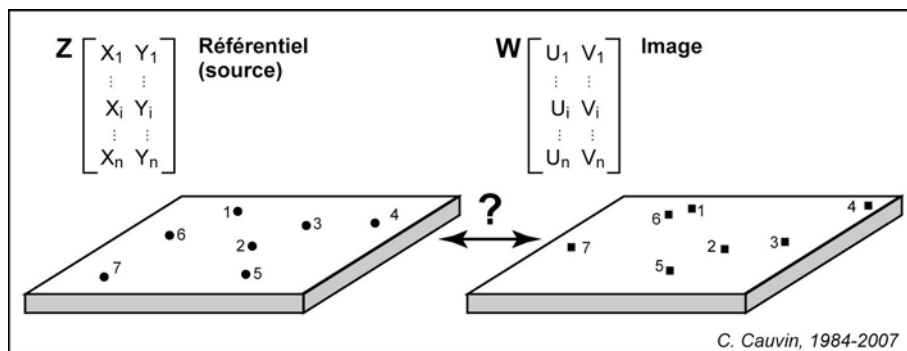


Figure 1. Principe de la régression bidimensionnelle

*Cette méthode permet de comparer deux surfaces décrites par des points homologues et **seulement** de comparer deux surfaces décrites par des points homologues, ces points correspondant au phénomène étudié (positions en temps d'accès, positions estimées en cognition spatiale, positions sur des cartes anciennes, etc.)¹. Elle produit des images qui montrent les écarts et, éventuellement, les distorsions entre la surface de référence et la surface thématique à comparer.*

Elle comprend deux étapes (complétées, dans la version originelle, par la technique des triangles de Lawson) : un ajustement et une interpolation. Les résultats, tant statistiques que cartographiques, sont abondants comme le montrent la figure 2 et la partie 3 de ce fascicule. La méthode ne sera pas détaillée dans ce mode d'emploi ; nous renvoyons pour une connaissance plus approfondie du procédé, aux travaux de W. Tobler [1965, 1977, 1978, 1994] et aux publications de C. Cauvin sur le sujet [1984, 2008].

Le logiciel Darcy, associé à la régression bidimensionnelle, est un programme conçu et développé initialement en FORTRAN par W. Tobler entre 1965 et 1977, nécessitant alors une

¹ Les positions des points dans l'image peuvent être obtenues par calcul (par exemple par l'Analyse Multidimensionnelle des Proximités) ou par relevés, selon la problématique traitée.

imprimante ligne à ligne pour les résultats statistiques et un traceur pour les représentations graphiques. Il a été adapté dans un premier temps à Edmonton (Canada) par J. Honsacker en 1978. Dans un second temps, il a été transformé à Strasbourg successivement par A. Serradj en 1986 pour permettre des sorties avec un traceur Benson, par F. Briandet pour obtenir des images sur imprimante électrostatique, et par D. Badariotti sur imprimante laser. Quant à J. Hirsch, il a, d'une part, introduit de nouvelles options de sortie, et, d'autre part, assuré son entière conversion pour station de travail (type IBM RS 6000).

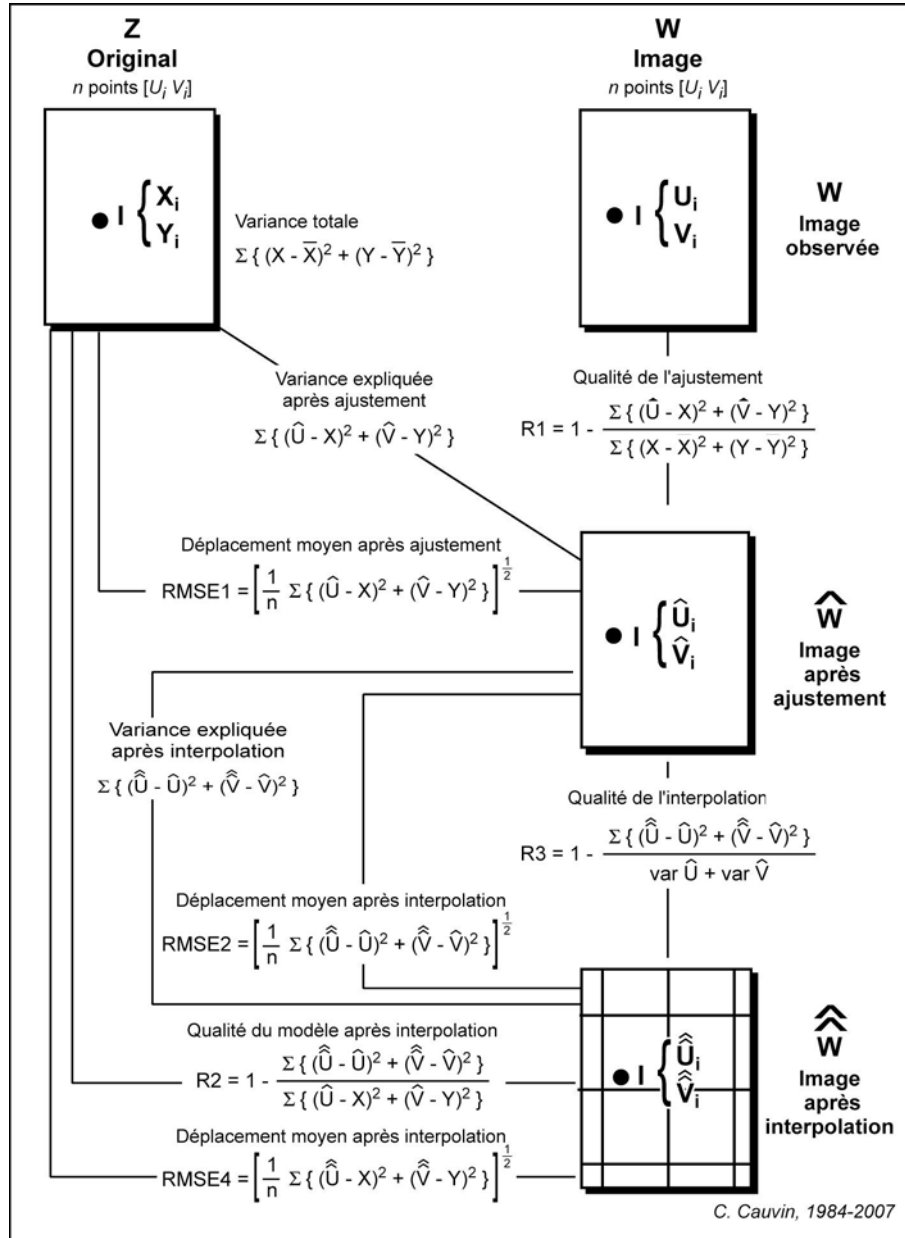


Figure 2. Étapes de la régression bidimensionnelle

Avec l'avènement des micro-ordinateurs, d'autres versions se sont avérées indispensables. W. Tobler a proposé, pour sa part, une adaptation de son programme pour IBM PC, disponible sur demande à l'Université de Californie à Santa Barbara (UCSB). Une version réécrite en C par B. Guérin a permis son utilisation sur une plate-forme Macintosh (système antérieur à MacOS X).

La version correspondant à ce mode d'emploi tient compte des transformations actuelles de l'informatique ; écrite en Java, elle est développée par G. Vuidel et peut fonctionner tant sur PC (Windows XP, Vista, Linux) que MacIntosh (à partir de MacOS X). La seule contrainte est d'avoir préalablement installé Java 5 (j2se 1.5) ou une version ultérieure. Java est gratuit et téléchargeable sur le site <http://www.java.com>. Après avoir installé Java, il faut télécharger Darcy sur le web, à l'adresse <http://spatial-modelling.info/-Spatial-analysis-tools-> ; son utilisation est libre de droit.

Afin de faciliter l'utilisation du logiciel, les deux premières parties de ce livret présentent les règles générales de préparation des données ainsi que les options de lecture, de calcul et de tracé. La troisième propose une lecture commentée des résultats.

1.

Préparation et lecture des données

Les données à entrer comprennent les coordonnées des points-source et des points-image, éléments indispensables ; elles incluent éventuellement les coordonnées d'illustrations quelle que soit leur forme (points, lignes, contours fermés ou non). Elles peuvent être ou préparées dans un logiciel quelconque, tel un tableur, ou au format *.shp* (ESRI *shapefile*) provenant d'un SIG (Système d'Information Géographique) comme ArcGIS ou QGIS. Nous allons exposer de manière détaillée la préparation des données avec un tableur et nous compléterons avec les indications nécessaires pour utiliser des données issues d'un SIG.

1.1. Préparation des données

Les données, qu'il s'agisse des coordonnées des points-source $[XY]$, des points-image $[UV]$ ou des illustrations $[XY]^2$, se présentent toutes d'une manière identique. Elles sont préparées dans un tableur, un éditeur ou un traitement de texte, stockées dans des fichiers et enregistrées en mode texte, les valeurs étant séparées par des blancs ou des tabulations. La décimale est caractérisée par un point ; s'il n'y a pas de décimale, le nombre peut ou non être suivi d'un point.

<i>Exemple</i>	2.15	ou	2.6
	2.	ou	2

Trois types de fichiers peuvent être créés selon les besoins :

- un fichier « origine » comprenant les coordonnées $[XY]$ des points de la surface source $[Z]$;
- un fichier « image » comprenant les coordonnées $[UV]$ des points de la surface image $[W]$;

Ces deux fichiers sont obligatoires

- éventuellement, un fichier « illustration » regroupant tous les tracés concernant un fond de carte, un contour général, des polygones...

Leur présentation est identique dans son principe et comprend pour chaque fichier :

- une ligne titre ;
- une ligne par paire de coordonnées ;

² Les coordonnées des illustrations sont exprimées dans le même système de référence que les points-source.

1.1.1. Préparation du fichier des points-source [XY]

Il comprend les coordonnées des points de référence [XY] de la surface source. Son organisation est la suivante (figure 3) :

- une ligne, en tête de fichier, indiquant le titre ;
- n lignes avec, chacune, une paire de coordonnées correspondant à la localisation d'un point ; n est égal au nombre de points-source. Chaque coordonnée d'une paire est séparée par un espace ou une tabulation.

Coordonnees XY - Acces route Luxembourg	
39.75	-158.62
89.66	-268.73
103.76	-82.8
192.66	-206.63
139.45	-167.89
.....	
133.22	-261.49
241.43	-235.2
74.80	-120.4
69.34	-84.58
212.09	-283.97

Figure 3. Exemple de fichier des points-source

1.1.2. Préparation du fichier des points-image [UV]

Il comprend les coordonnées des points [UV] de la surface image, homologues aux points [XY] de la surface source. Il est organisé d'une manière identique à celle des coordonnées des points-source (figure 4) :

- une ligne, en tête de fichier, indiquant le titre ;
- n lignes avec, chacune, une paire de coordonnées correspondant à la localisation d'un point ; n est égal au nombre de points-source et, par suite, de points-image. Chaque coordonnée d'une paire est séparée par un espace ou une tabulation.

Attention ! L'ordre des points entre les deux fichiers est important. Le premier point du fichier source sera mis en correspondance avec le premier point du fichier image et ainsi de suite...

Coordonnees Image UV - Acces route Luxembourg	
-0.991	0.648
-0.252	-0.498
-0.015	1.393
0.632	0.186
0.156	0.626
.....	
0.096	-0.269
0.911	-0.404
-0.661	1.068
-0.597	1.477
0.947	-0.621

Figure 4. Exemple de fichier des points-image

1.1.3. Préparation du fichier des illustrations [XY]

Le fichier des illustrations comprend les coordonnées décrivant un « fond de carte » de référence, qu'il s'agisse d'un contour fermé ou de simples illustrations comme le tracé des rues dans une ville. Il peut s'agir de points, de lignes ou de surfaces décrits par une succession de points (figure 5). Ces points sont relevés dans le système de coordonnées des points-source [XY].

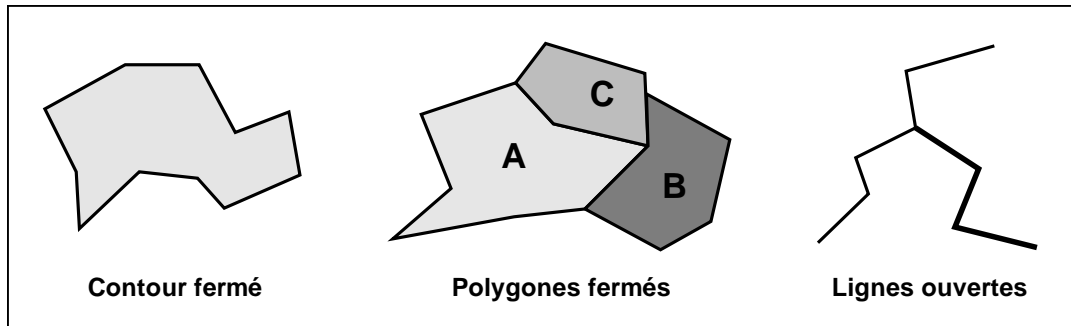


Figure 5. Types d'illustrations

L'organisation, conforme au principe énoncé ci-dessus, est sensiblement identique à celle des fichiers contenant les coordonnées des points-source ou des points-image (figure 6) :

- une ligne, en tête de fichier, indiquant le titre ;
- n lignes avec, chacune, une paire de coordonnées correspondant à la localisation d'un point de la figure ; n est égal au nombre de points nécessaire pour décrire les chaînes qui traduisent les formes à tracer : ligne ouverte, polygone fermé ou contour externe... Chaque coordonnée d'une paire est séparée par un espace ou une tabulation. Chaque forme est terminée par un **A** (majuscule) en colonne 1, placé devant la dernière paire de coordonnées de la forme décrite et séparé de cette dernière par un espace ou une tabulation. Il y a autant de **A** que de formes ou de chaînes distinctes.

Contour externe Luxembourg		Limites internes		
130.3	-35.31	136.14	-52.83	} Chaîne 1 = ligne ouverte
128.65	-40.51	134.49	-52.83	
130.81	-41.66	133.99	-54.99	
128.52	-43.43	135.51	-55.24	
128.27	-46.23	135.64	-62.36	
136.27	-50.16	133.48	-62.99	
.....		A 135.00	-65.40	
		57.66	-85.85	
		52.32	-81.28	
117.22	-31.50	53.21	-77.09	
118.62	-29.72	61.47	-66.29	
120.65	-31.24	63.37	-63.50	
123.19	-30.35	64.39	-56.51	
130.68	-34.93	67.31	-53.09	
A 130.30	-35.31	A 57.66	-	

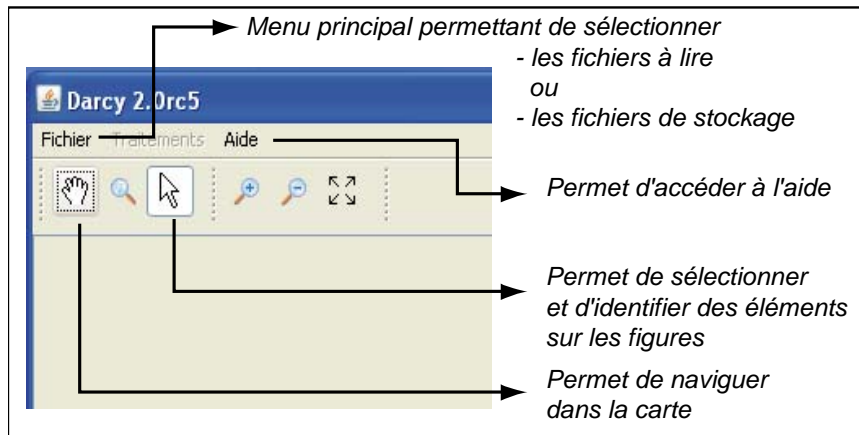
Figure 6. Exemple de fichier des illustrations

Ce fichier peut comprendre simultanément des informations spatiales ponctuelles, linéaires ou surfaciques, placées les unes après les autres, le **A** (majuscule) séparant et identifiant les chaînes correspondant aux diverses formes à représenter. Les illustrations ne sont pas indispensables mais elles facilitent grandement la lecture des images après transformation.

Lorsque les données proviennent d'un SIG, des fichiers *.shp* (*shapefile*) peuvent être utilisés pour exprimer tant les points-source, les points-image que les illustrations. Ils se lisent directement comme nous allons le voir dans le paragraphe suivant.

1.2. Lecture des données

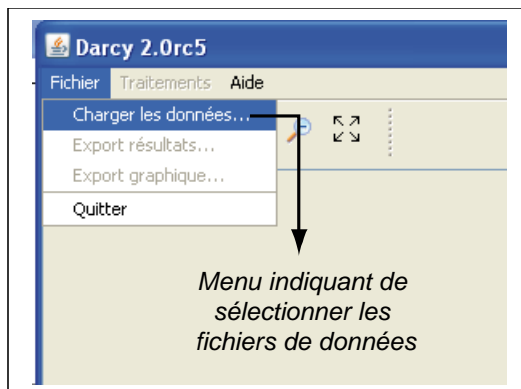
Les données se lisent avec le logiciel Darcy³. Pour ce faire, lancer l'application Darcy en cliquant sur son icône. Une fenêtre s'affiche avec une barre de menus comprenant deux lignes (figure 7) :



– la première est formée de 2 menus actifs : *Fichier* et *Aide*

– la seconde comprend des icônes qui sont permanentes lors de l'utilisation du logiciel, comme la sélection des options ou celle des éléments sur les figures lorsque ces dernières s'affichent.

Figure 7. Barre de menu principal



Dérouler le menu *Fichier* et sélectionner l'option *Charger les données* (figure 8).

Une nouvelle fenêtre (figure 9) s'affiche visualisant les catégories de fichiers à ouvrir : coordonnées de la surface source, de la surface image et du fond de référence (ou illustrations). Sélectionner successivement les différents fichiers.

Figure 8. Appel des données

Dans le cas de fichiers *shapefile*, sélectionner dans la liste déroulante [Id], le champ qui fournira les identifiants pour les points-source et les points-image. Ces identifiants doivent être uniques et identiques entre les points-source et les points-image. Il est fortement déconseillé de laisser (*Auto*) pour des *shapefile* ; en effet, l'ordre de lecture n'est pas garanti et, par suite, la correspondance des points peut être erronée.

³ Dans le programme originel développé par W. Tobler et les versions ultérieures, les coordonnées des points pouvaient être exprimées en longitude, latitude, comme en coordonnées rectangulaires. Etant donné les facilités de conversion actuelles avec la multiplication de l'utilisation des SIG, il n'a pas semblé utile d'introduire une autre présentation des coordonnées que celle des coordonnées rectangulaires.

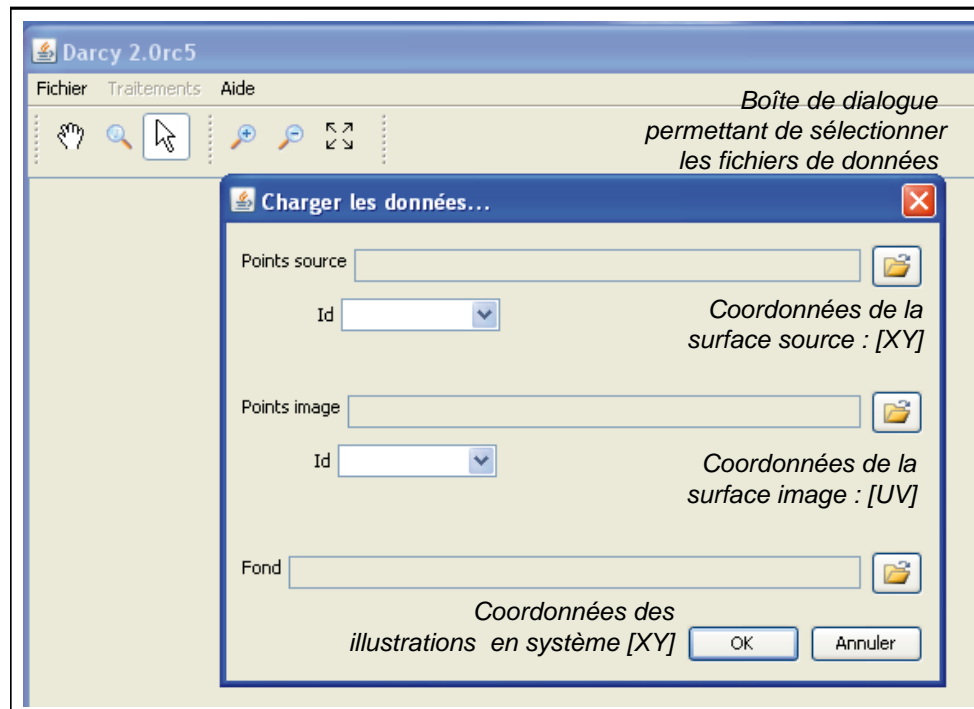


Figure 9. Boîte de dialogue pour la sélection des données

Une fois les fichiers sélectionnés, une fenêtre s'affiche avec trois parties distinctes (figure 10) :

– la barre de menus avec les deux lignes déjà décrites. Sur la première, un troisième menu apparaît *Traitements* ;

– la partie de gauche où sont indiqués les éléments affichés ou affichables dans la partie de droite ; cette partie gauche sera modifiée après chaque traitement. Si l'on clique sur la case *couche* de la deuxième ligne de la barre de menus, cette partie de la fenêtre disparaît ; elle réapparaît en cliquant à nouveau sur l'icône *couche* ;

- Les points de la surface Source ou de la surface Image peuvent s'afficher ou non sur la carte, selon que les cases qui sont associées aux termes *source* et *image* du dossier Projet sont cochées ou non. Avec le clic droit de la souris appliqué sur l'un de ces deux noms, un menu contextuel apparaît qui permet de modifier le *style* (couleur des points et du texte) ou d'exporter les données associées soit en fichier *shapefile* soit en fichier *Texte* (figure 11).

- On peut joindre les points homologues de la source et de l'image en cochant l'option *source – image* précédée d'une flèche rouge dans la partie gauche de la fenêtre, en sachant que l'information graphique obtenue n'est qu'indicative. Avec le clic droit de la souris, le *style* (= la couleur des flèches) peut être modifié.

- L'option *Fond* concerne les illustrations de la carte de référence. Les options disponibles pour leur sauvegarde ou leur modification graphique sont les mêmes que celles utilisées pour les points-source et les points-image.

– la partie de droite où apparaissent les résultats graphiques. Par défaut, s'affiche une figure avec tous les éléments lus : les points de la source et les illustrations en bleu, les points de l'image en rouge. Ces derniers sont plus ou moins décalés par rapport à la source selon les différences de systèmes de référence des deux ensembles et les écarts entre les localisations. La présence des deux ensembles sur la même figure souligne l'impossibilité d'une comparaison directe. La figure affichée peut être sauvegardée au format SVG en utilisant le menu *Fichier* et l'option *Export graphique* (figure 18).

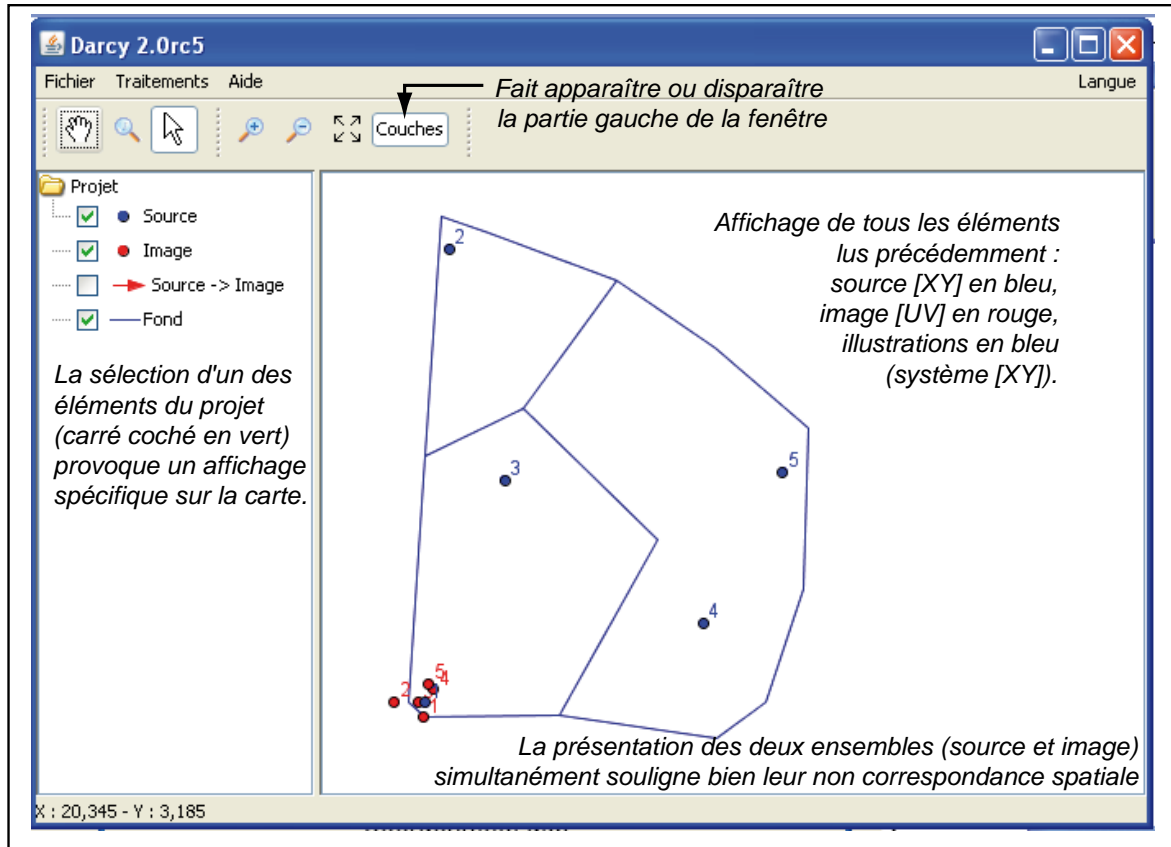


Figure 10. Affichage des éléments lus et sélectionnés

Désormais, les choix concernant les transformations, les calculs et les tracés peuvent être effectués et, ainsi, des résultats et cartes obtenus.

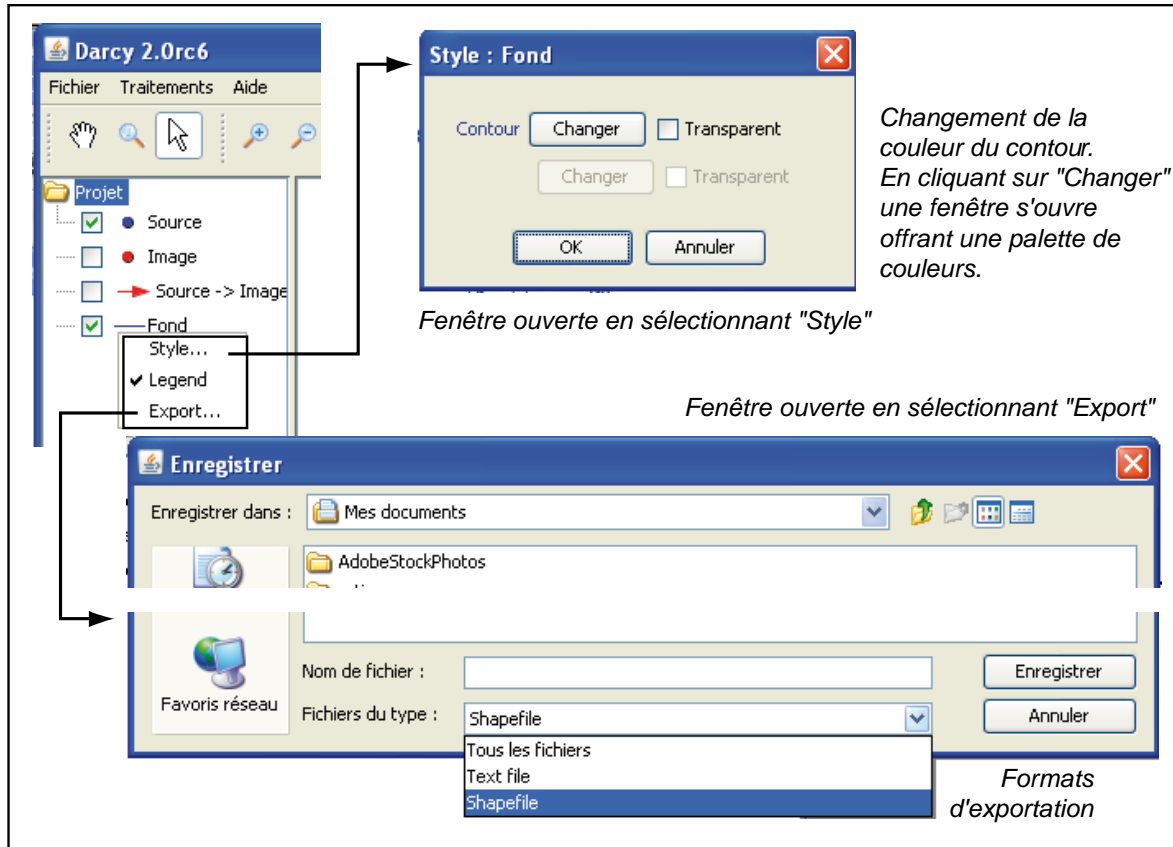


Figure 11. Options liées au clic droit de la souris

2.

Options de calcul et de tracé

Les options de calcul pour les différentes étapes de la méthode et les choix concernant les représentations cartographiques sont indiqués à l'aide de menus successifs, en partant du menu *Traitements* de la barre de menus supérieure (figure 12). Deux transformations sont proposées : *Ajustement* et *Interpolation*.

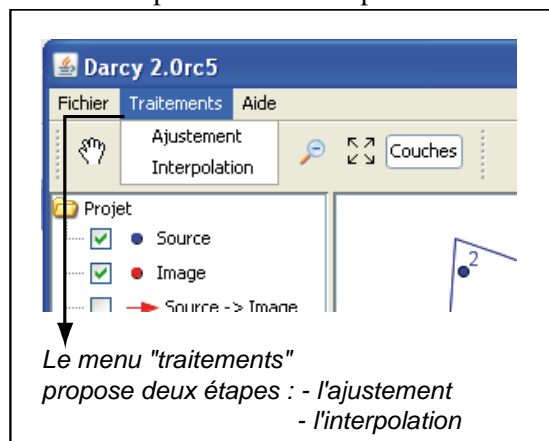


Figure 12. Menu Traitements

Il est en général souhaitable de procéder dans un premier temps à un ajustement ; cependant, dans certains cas, il est possible de n'appliquer que l'interpolation. Ainsi, lorsque les coordonnées-image proviennent des méthodes Isodist, Isoangle et Distangle, leurs valeurs sont déjà ajustées sur le référentiel. Il est donc inutile de procéder à un nouvel ajustement. L'utilisateur passe directement à l'option *Interpolation*.

2.1. Étape 1 : ajustement

Dans le menu *Traitements*, sélectionner l'option *Ajustement* (figure 13). Une nouvelle fenêtre s'affiche proposant différentes options pour l'opération d'ajustement.

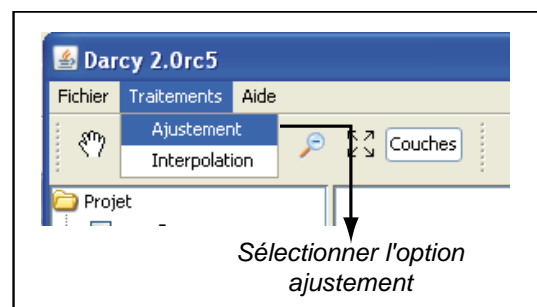


Figure 13. Option Ajustement

2.1.1. Options de l'étape d'ajustement

L'étape d'ajustement implique de choisir un type d'ajustement parmi trois options : euclidien, affine et projectif (figure 14). Les deux premières options seules sont actives dans cette version du programme, la solution projective n'ayant pas été programmée pour l'instant⁴.

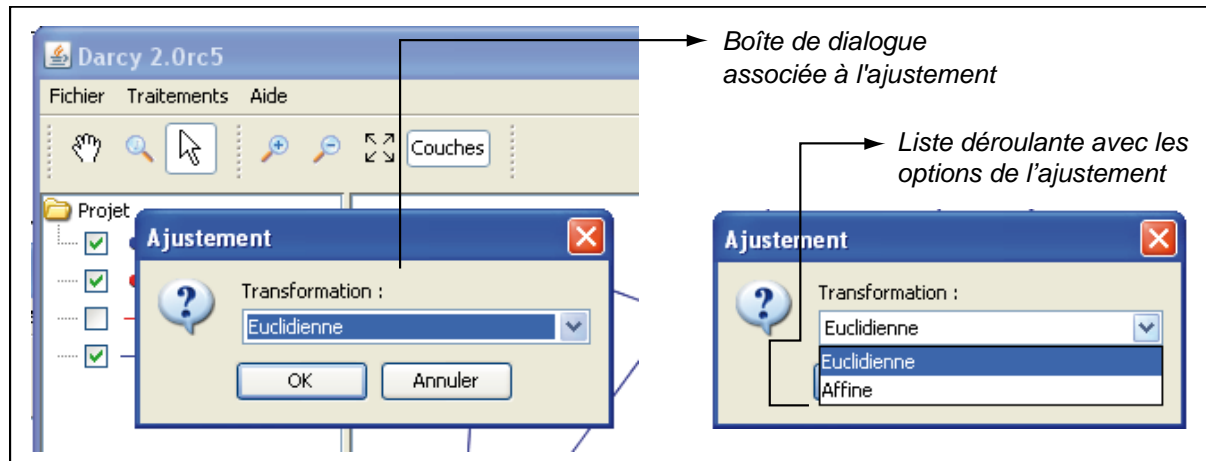


Figure 14. Ajustement et options

À ce stade, des résultats numériques et graphiques sont obtenus.

2.1.2. Affichage des résultats

Les résultats numériques s'affichent dans une nouvelle fenêtre alors que les résultats graphiques apparaissent dans la partie droite de la fenêtre principale.

2.1.2.1. Résultats numériques

Les résultats numériques (figure 15), qui seront détaillés dans la troisième partie de ce fascicule, comprennent deux parties :

- la première concerne les résultats liés à la transformation : qualité de l'ajustement (R) et déplacements moyens (RMSE), globaux et selon les directions des axes ;
- la seconde décrit les caractéristiques de l'ajustement : angle de rotation, échelle (seulement dans le cas d'un ajustement euclidien), coefficient des équations de transformation, etc.

Cette fenêtre disparaît en cliquant sur OK, mais les résultats sont conservés. Ils peuvent être enregistrés dans un fichier texte en sélectionnant l'option *Export résultats...* du menu *Fichier* de la barre de menu (figure 16). Tous les résultats statistiques sont ainsi visualisables par la suite avec un éditeur, un traitement de texte ou un tableur. Il est conseillé de n'effectuer cette sauvegarde qu'à la fin de l'ensemble des traitements pour éviter de multiplier les fichiers redondants.

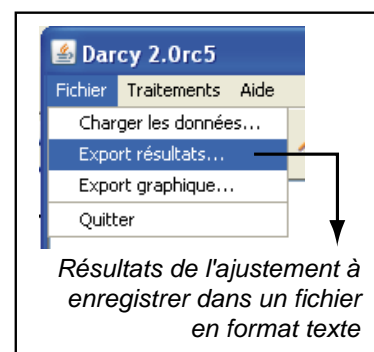


Figure 16. Exportation résultats

⁴ En effet, l'ajustement projectif n'a pas été intégré pour l'instant. Sa programmation demande de faire appel à des techniques de photogrammétrie.

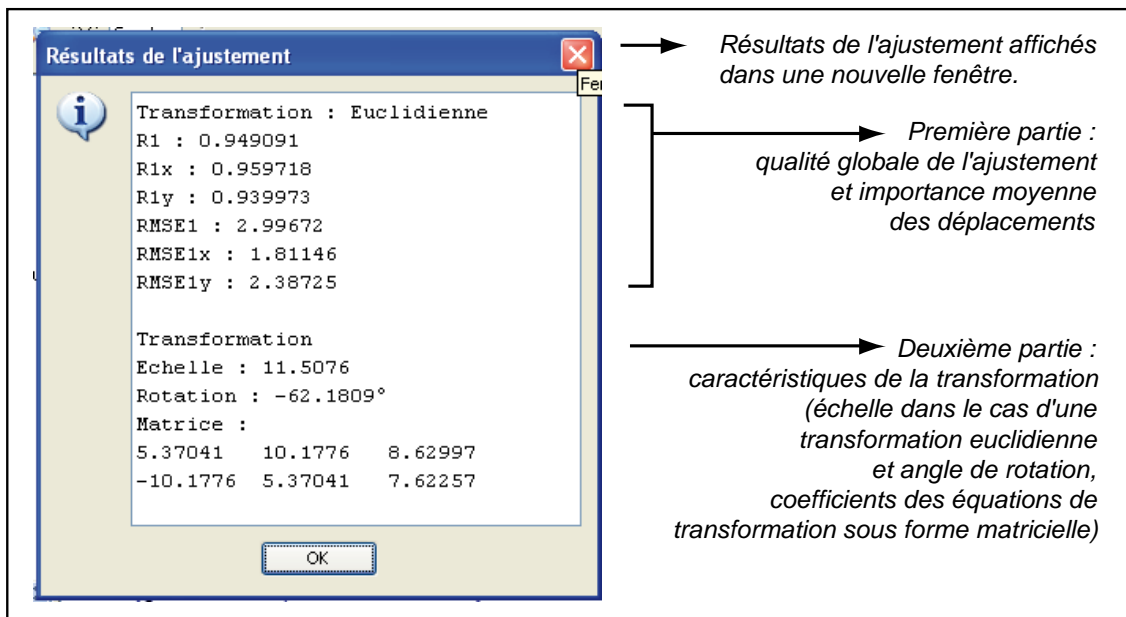


Figure 15. Résultats de l'ajustement

2.1.2.2. Résultats graphiques

Les résultats graphiques apparaissent dans la partie droite de la fenêtre de base. Par défaut, s'affiche le fond de carte sans déformation avec les points homologues de la source [XY] en bleu et de la surface ajustée [$\hat{U}\hat{V}$] en orange. Ces couleurs peuvent être modifiées en utilisant le clic droit de la souris et en sélectionnant l'option *Style*. S'affichent également en orange les vecteurs de déplacement (figure 17).

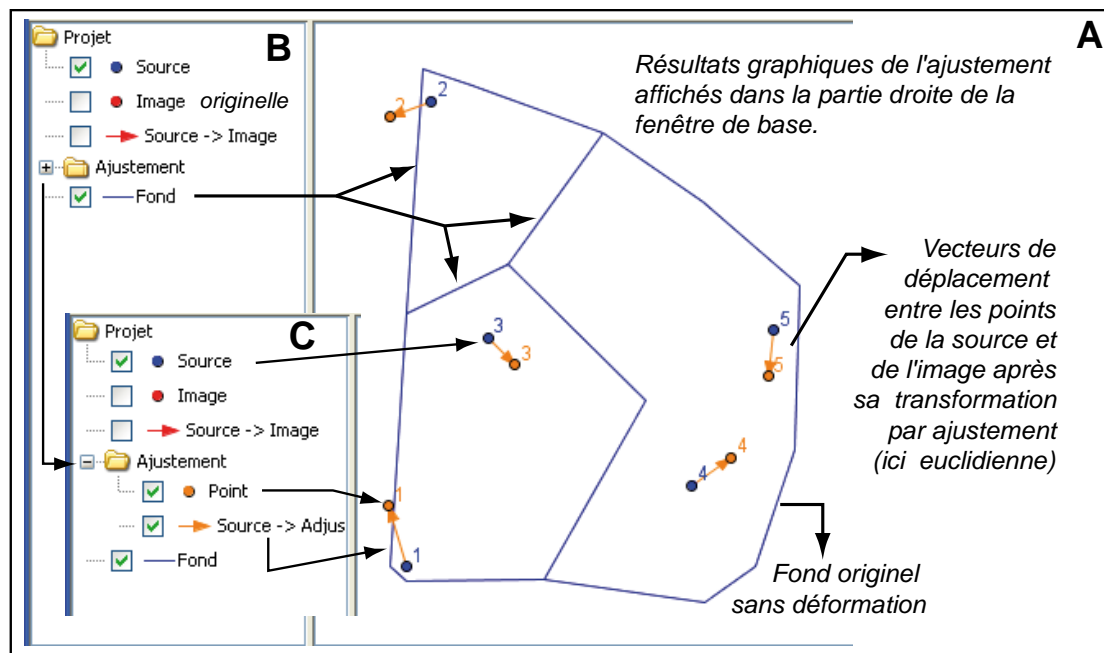


Figure 17. Affichage des résultats graphiques de l'ajustement

Sur la partie gauche de la fenêtre, si l'opération d'ajustement est précédée du signe plus, la liste des options d'affichage pour l'ajustement est incomplète (figure 17 B). Pour faire apparaître les différentes options, cliquer sur le signe *plus* et développer ainsi l'offre de visualisation de l'ajustement (figure 17 C). Les éléments affichés correspondent aux cases cochées. Par exemple, pour ne faire apparaître que les points-source et les points-image ajustés (= sans les vecteurs de déplacement), il faut décocher la case *source-ajustement* précédée d'une flèche. Chaque case cochée à gauche fait apparaître à droite l'élément correspondant ; chaque case décochée le fait disparaître. Toutes les combinaisons sont ainsi permises et choisies en fonction des besoins. Des variations de couleur sont également possibles en utilisant le clic droit de la souris et en choisissant la sous-option *style*.

La sauvegarde des images (figure 18) par l'option *Export Graphique* du menu déroulant *Fichier*, s'effectue en format SVG lisible entre autres par Adobe Illustrator et Inkscape, ce qui permet de procéder à une mise en page ultérieure, en fonction des besoins.

Une sauvegarde en *shapefile* ou en format *texte* est également possible en pointant la couche à sauvegarder dans la partie gauche de la fenêtre (*Point* ou *Fond*), à l'aide du clic droit de la souris et en choisissant l'option *Export* dans le menu contextuel affiché (cf. figure 11, §1.2).

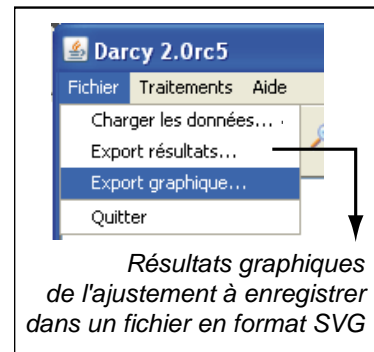


Figure 18. Export graphique

La description et l'explication détaillée des figures obtenues après l'ajustement seront présentées dans la troisième partie de ce fascicule.

2.2. Étape 2 : interpolation

Dans le menu *Traitements* de la barre de menus supérieure, sélectionner l'option *Interpolation* (figure 19). Une nouvelle fenêtre s'affiche proposant différentes options pour l'opération d'interpolation.

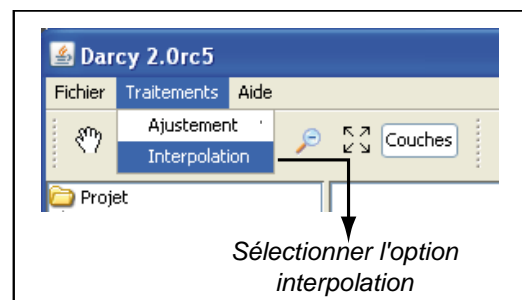


Figure 19. Option Interpolation

2.2.1. Options liées à l'interpolation

Deux options s'offrent à l'utilisateur (figure 20) :

– la première indique quelles données utiliser pour l'interpolation : en général, on choisit d'effectuer les calculs sur les coordonnées issues de l'ajustement (option par défaut). On travaille directement sur les coordonnées initiales lorsque les données de l'image ont déjà été ajustées par un traitement quelconque, comme nous l'avons déjà signalé dans l'introduction de la partie 2 de ce fascicule ;

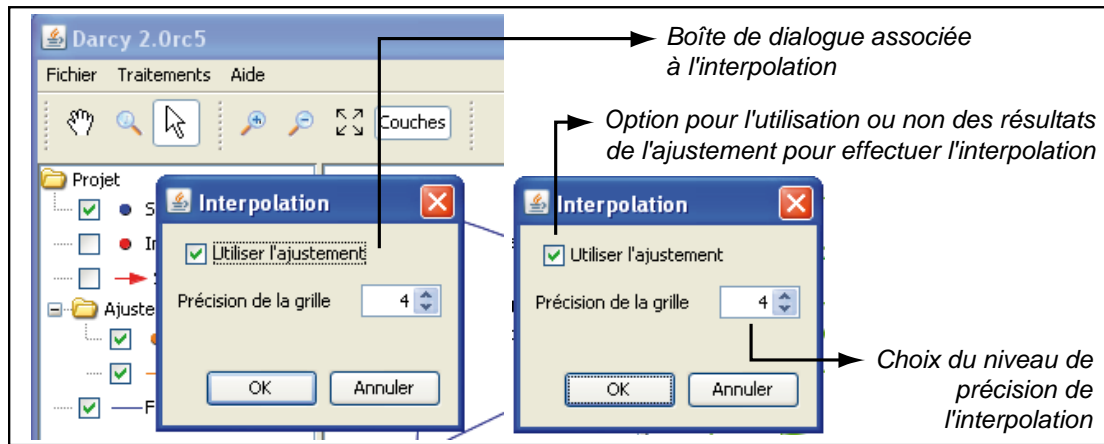


Figure 20. Options de l'interpolation

– la seconde permet de donner le niveau de précision de l'interpolation en fournissant une valeur numérique pour le paramètre α qui pondère la taille de la cellule de base de la grille d'interpolation⁵ : $\alpha = 0.5$, l'interpolation est grossière ; lorsque ce chiffre augmente, l'interpolation devient de plus en plus fine. $\alpha = 2$ donne un résultat en général satisfaisant (figure 21).

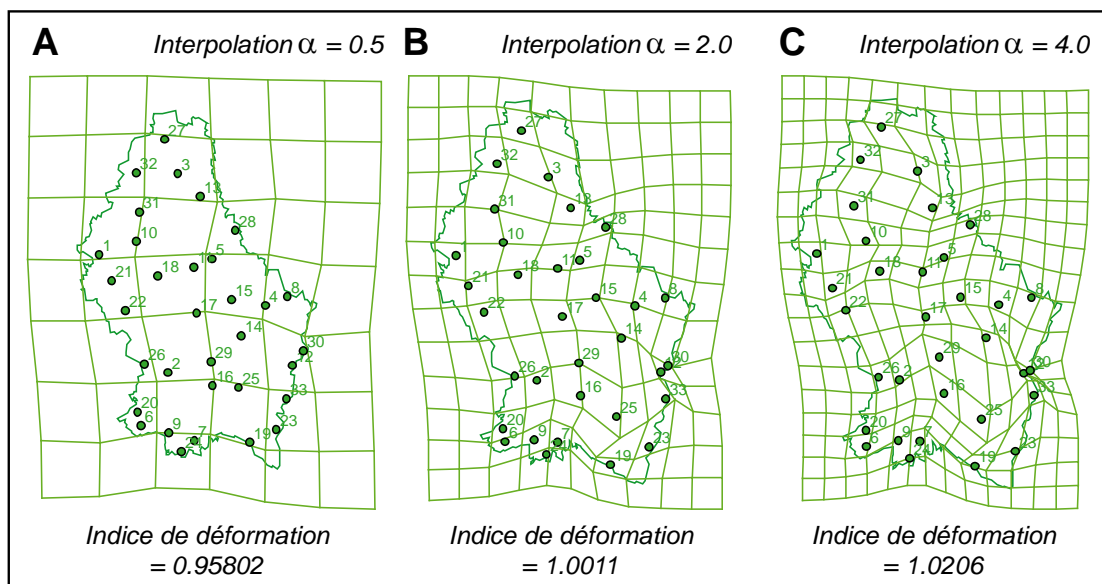


Figure 21. Variation du niveau de précision de l'interpolation

2.2.2. Résultats associés à l'interpolation

Comme pour l'ajustement, des résultats numériques et graphiques s'affichent lorsque l'interpolation a été appliquée (ce qui implique parfois un temps d'attente plus ou moins long selon la finesse de l'interpolation).

⁵ Soit dX et dY la longueur et la largeur du rectangle définissant la grille d'interpolation, et n le nombre de points-source. La définition de la grille est donnée par la formule : $\rho = \sqrt{(dX \times dY / n)} / \alpha$, les limites du rectangle étant calculées en prenant en compte les points extrêmes de la figure source, y compris les illustrations.

2.2.2.1. Résultats numériques

Les résultats numériques (figure 22), qui seront détaillés dans la troisième partie de ce fascicule, portent sur :

- les points homologues (qualité de l'interpolation, du modèle, déplacements moyens) ;
- l'ensemble des surfaces (quantité de déformation : M et M^2).

Cette fenêtre disparaît en cliquant sur OK, mais les résultats sont conservés. Ils peuvent être enregistrés comme précédemment, dans un fichier texte en sélectionnant l'option *Export résultats* du menu *Fichier* de la barre de menu (figure 16).

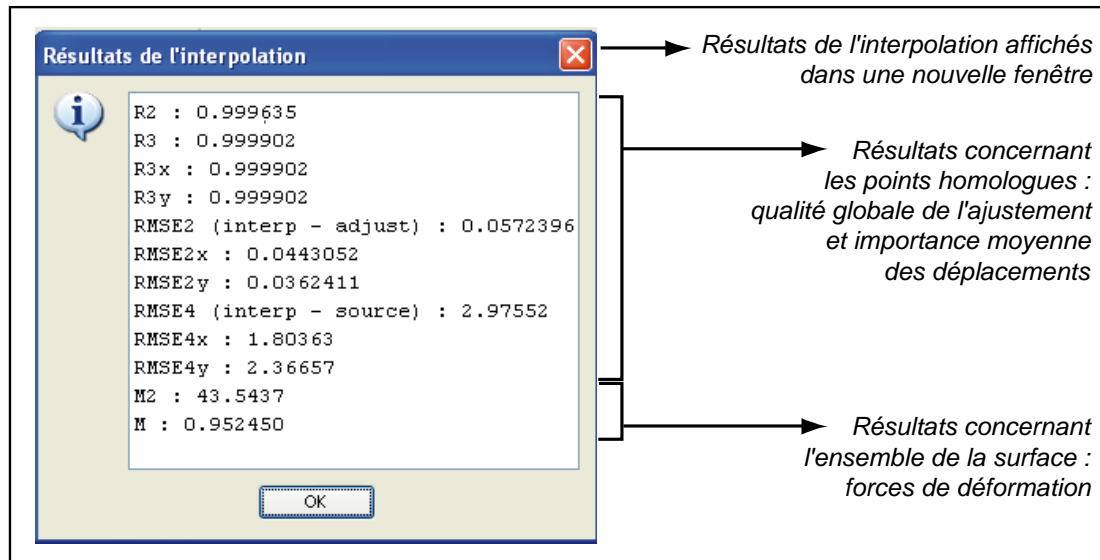


Figure 22. Résultats numériques associés à l'interpolation

D'autres résultats numériques peuvent être obtenus tant pour les points homologues que pour l'ensemble des surfaces par exportation à l'aide du clic droit de la souris. Pour ce faire, cliquer sur la couche dont les informations numériques sont à sauvegarder dans un fichier et sélectionner l'option *Export*, en choisissant le format *Textfile*. Le fichier est alors sauvegardé en format *Texte brut* et peut être lu avec un éditeur ou un tableur. Ainsi on peut récupérer des informations non directement visibles en cliquant sur une couche donnée :

- la couche *Point* (dans le dossier interpolation) fournit les coordonnées des points homologues interpolés ;
- la couche *Nœud* (dans le dossier interpolation) contient toutes les caractéristiques attachées à chaque nœud : coordonnées après interpolation, quantité de déformation (m), les quatre dérivées partielles, l'angle donnant l'orientation de l'axe principal de l'ellipse de déformation, les deux rayons orthogonaux de cette ellipse (r_x et r_y) ;
- la couche *Fond* (dans le dossier interpolation) donne les nouvelles coordonnées des illustrations après interpolation ;
- la couche *Grille* (dans le dossier interpolation) regroupe les coordonnées des nœuds de la grille après interpolation ;
- la couche *Poids des nœuds* (hors du dossier interpolation) réunit les coordonnées avant interpolation des nœuds de la grille, le poids des nœuds et leurs coordonnées après interpolation ;
- la couche *Fond* (hors du dossier interpolation) donne les coordonnées originelles des illustrations.

Les autres résultats numériques sont récupérés en utilisant l'option *Export résultats* du menu Fichier (cf. figure 16). L'ensemble des résultats numériques sera explicité lors de la présentation des résultats dans la partie 3 de ce fascicule.

2.2.2.2. Résultats graphiques

Les résultats graphiques apparaissent dans la partie droite de la fenêtre de base comme précédemment. Par défaut, s'affiche le fond de carte transformé avec les points homologues de la source [XY] en bleu et de la surface interpolée [$\hat{U}\hat{V}$] en vert, ainsi que la grille de déformation en vert également. S'y ajoutent les vecteurs de déplacement toujours en vert (figure 23 a). Sur la partie droite de la fenêtre l'opération d'interpolation est précédée du signe *plus* et n'indique aucune sélection (figure 23 b).

Pour obtenir des variations sur cet affichage par défaut et des résultats complémentaires, il faut cliquer sur le signe *plus* pour développer l'offre de visualisation de l'ajustement (figure 22 c). Sont cochées les cases permettant d'afficher les éléments cités ci-avant. Pour ne faire apparaître que les points homologues (sans les vecteurs de déplacement qui les relient), il faut décocher la case *source-interpolation* précédée d'une flèche. Chaque case cochée à gauche fait apparaître à droite l'élément correspondant ; chaque case décochée le fait disparaître. Toutes les combinaisons sont ainsi permises et les principales associées dans certains cas à des résultats statistiques complémentaires vont être décrites dans le paragraphe 2.2.2.3.

La sauvegarde des images (figure 18) en format SVG, lisibles entre autres par Illustrator et Inkscape, s'effectue comme indiqué dans le paragraphe 2.1.2.2. Les nouvelles couches ainsi que la grille déformée sont toujours exportables au format *shapefile* (cf. figure 11). L'image des déformations est aussi exportable au format TIFF, en utilisant le clic droit de la souris.

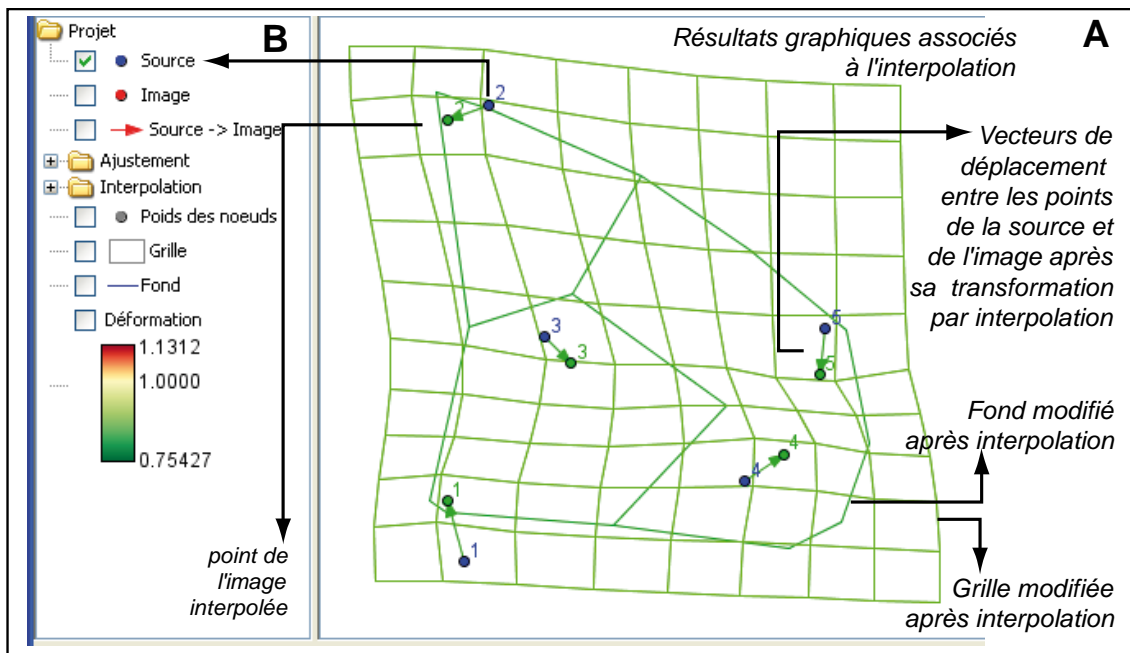


Figure 23. Résultats graphiques liés à l'interpolation par défaut

2.2.2.3. Résultats cartographiques

Les résultats cartographiques sont abondants en fonction des options sélectionnées. Ils sont présentés ici avec l'exemple de l'accessibilité routière au Luxembourg⁶, plus expressif que l'exemple manuel retenu qui servira davantage pour la description analytique des résultats complets. On peut distinguer les résultats liés aux points homologues de ceux concernant l'ensemble de la surface.

Cartes liées aux points homologues

Trois cartes principales associées à l'ajustement peuvent être produites (Figure 24) :

- la *carte de la source* propose les localisations des points de la figure source $[XY]$ avec éventuellement le même fond de carte (illustrations) ;
- la *carte de l'image ajustée* (ou estimée) contient les localisations des points homologues de l'image après ajustement $[\hat{U}\hat{V}]$;
- la *carte des cartes des différences Source-Ajustement* montre les vecteurs de déplacements après ajustement. L'origine des vecteurs est la position de référence $[XY]$, leur extrémité la position du point homologue après ajustement $[\hat{U}\hat{V}]$.

D'autres cartes peuvent être produites liées à l'interpolation et concernant les points homologues ; elles peuvent aussi être associées aux deux étapes :

- la *carte des positions des points homologues interpolées* sur fond non déformé avec grille de base non déformée également (figure 25 a) ou sur fond déformé avec grille déformée ; cette dernière représentation correspond à ce qui est communément appelé l'anamorphose (figure 25 b) ;
- la *carte des différences Source-Interpolation* montre les vecteurs de déplacements après interpolation. L'origine des vecteurs est la position de référence $[XY]$, l'extrémité la position du point homologue après interpolation $[\hat{U}\hat{V}]$, mais on peut choisir de faire apparaître l'un ou l'autre ou encore les deux (figure 25 c, d). En général, c'est le fond déformé qui sert de repérage accompagné la plupart du temps par la grille d'interpolation déformée qui en facilite grandement la lecture (figure 25 e) ;

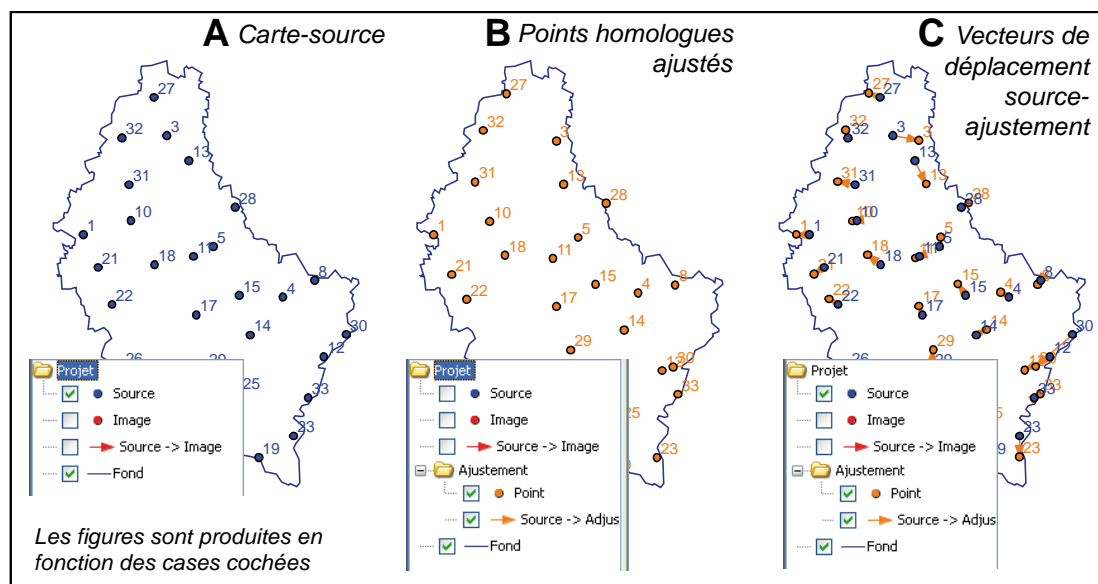


Figure 24. Résultats graphiques liés à l'ajustement

- la *carte des vecteurs de déplacement entre les images ajustées et interpolées* (figure 25 f). L'origine des vecteurs est la position du point-image ajusté $[\hat{U}\hat{V}]$ et leur extrémité la position du point-image

⁶ Les données utilisées ont été fournies par J. Braun que nous remercions ; il avait effectué en 1994 une étude sur l'accessibilité comparée (rail-route) au Luxembourg [Braun, 1994].

après interpolation $[\hat{U}\hat{V}]$. Comme dans le cas précédent, c'est le fond déformé qui sert, si nécessaire, de repérage, accompagné la plupart du temps par la grille d'interpolation.

Cartes concernant la surface dans son ensemble

D'autres représentations associées à de nouveaux résultats statistiques portent sur l'ensemble de la surface et non plus sur les points homologues ; elles correspondent à une généralisation des résultats à l'ensemble de la surface. On peut en identifier trois principalement :

– *la carte du champ vectoriel* montre le déplacement de chaque nœud de la grille d'interpolation entre sa position de référence et sa position après interpolation ; elle est en général associée avec le fond de référence sans déformation (figure 26 a). Cependant il est possible de lui associer le fond déformé, la grille et les nœuds après déformation ;

– *la carte des forces de déformation* (figure 26 b) exprime, sous forme d'isolignes soulignées par des couleurs dégradées, les gradients des forces de déformation (*stress tensor*) ; elle est également associée au fond et à la grille sans déformation mais rien n'empêche de faire appel au fond et à la grille déformés. Il est possible de modifier les couleurs et le tracé des isolignes en cliquant sur *Déformation* placé dans la partie gauche de la fenêtre principale : une nouvelle fenêtre apparaît avec plusieurs onglets, l'onglet *Général* pour les couleurs, et l'onglet *Isoligne* pour le nombre d'isolignes (figure 26 c) ;

– *la carte des ellipses de Tissot* (figure 26 d) illustre, sous forme d'ellipses plus ou moins circulaires ou aplaties, les conséquences des forces de déformation (*strain tensor*). L'habillage des ellipses est modifiable en appliquant le clic droit de la souris sur l'option *Ellipses* de la fenêtre de gauche : une nouvelle fenêtre s'affiche permettant de modifier les couleurs des ellipses (figure 26 e) ;

Une autre figure peut également être produite qui indique en chaque nœud la pondération affectée à ce nœud pour l'interpolation (figure 26 f).

La description et l'explication détaillée des figures obtenues après ces traitements ainsi que les résultats statistiques vont être désormais présentées dans la troisième partie de ce fascicule.

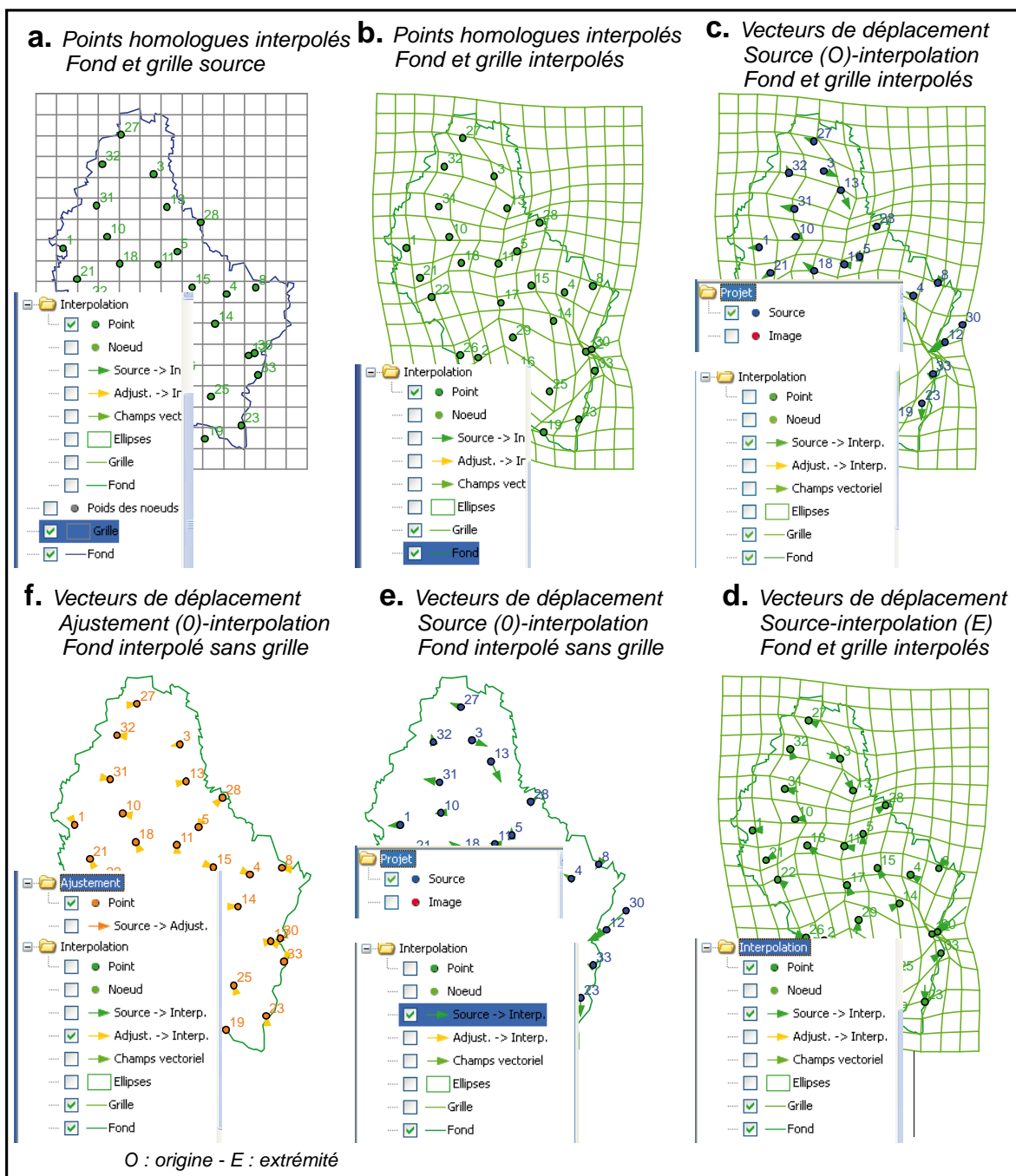


Figure 25. Résultats graphiques liés à l'interpolation

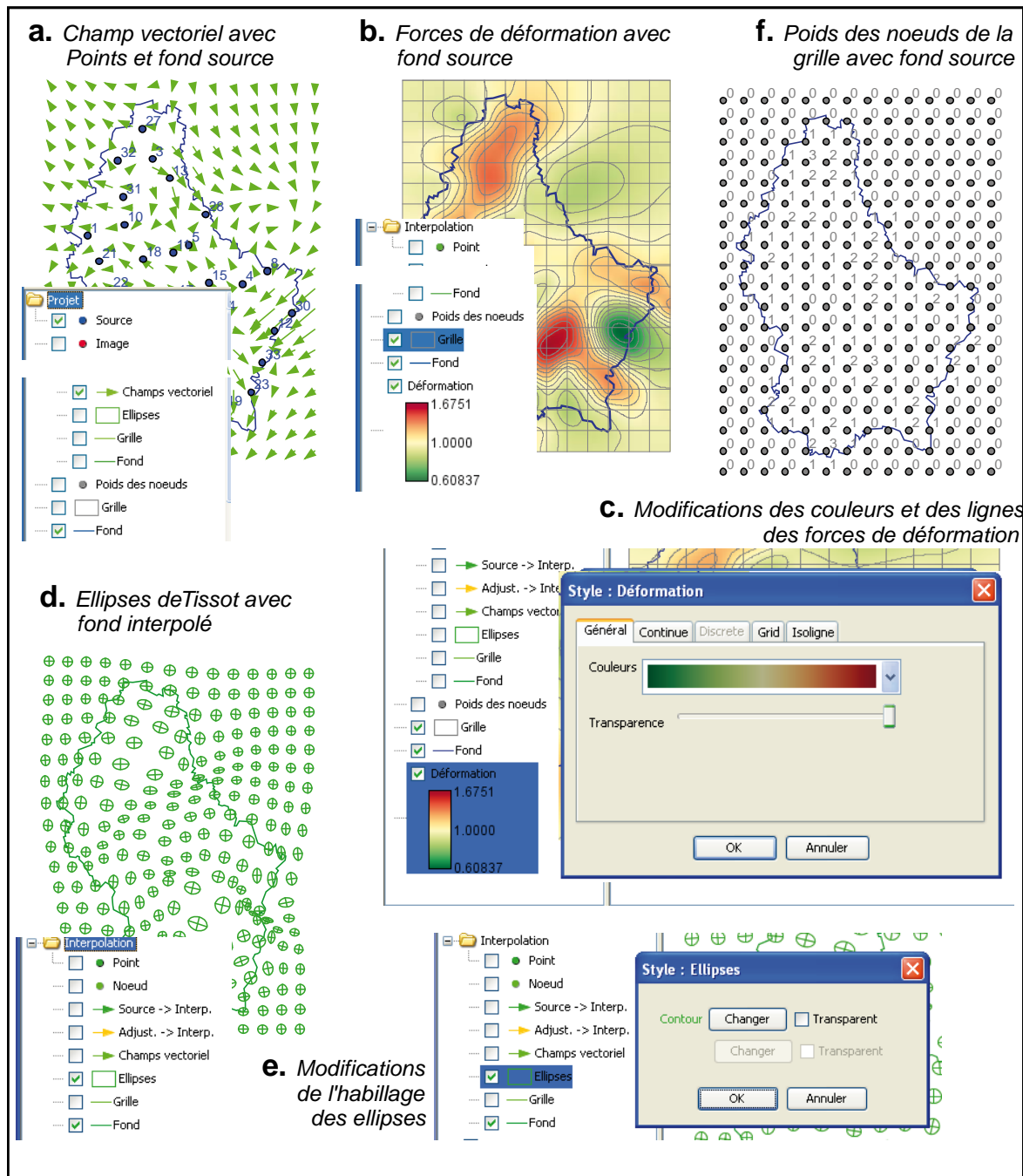


Figure 26. Résultats graphiques liés aux surfaces

3.

Lecture commentée des résultats

L'ensemble des traitements sur un couple de paires de points homologues aboutit à de nombreux résultats tant graphiques que statistiques qui nécessitent quelques explications. Dans la troisième partie de ce fascicule, nous les exposons de manière aussi complète que possible à l'aide de l'exemple de 5 points qui a déjà été utilisé dans certaines figures ; s'il n'a pas de signification thématique particulière, il présente l'avantage d'être facile à reconstruire et à calculer, même manuellement. Pour ce faire, nous associons les résultats statistiques exportés dans un fichier et les figures obtenues et exportées une à une en fonction des options sélectionnées.

Les premiers éléments affichés rappellent les fichiers utilisés et, donc, les données traitées en précisant le nombre de points homologues (figure 27).

Source points :	C:\Documents and Settings\pc\Bureau\Donnees_darcy\DossierOK\Exemple.manuel.new\SOURCE.txt
Image points :	C:\Documents and Settings\pc\Bureau\Donnees_darcy\DossierOK\Exemple.manuel.new\IMAGE.txt
Illustration :	C:\Documents and Settings\pc\Bureau\Donnees_darcy\DossierOK\Exemple.manuel.new\ILLUSTRATIONS.txt
Nb points :	5 <i>Nombre de points homologues</i>

Figure 27. Affichage des fichiers utilisés

3.1. Résultats liés à l'étape d'ajustement

Les caractéristiques de la transformation sont affichées après les résultats statistiques globaux et le mot « transformation » (figure 28). Elles comprennent l'échelle dans le cas d'une transformation euclidienne, l'angle de rotation de la figure pour l'ajustement et la matrice des coefficients de la transformation qui permettent d'établir les équations de transformation et de calculer les valeurs \hat{U} et \hat{V} des points ajustés.

Transformation			
Echelle : 11.5076	$Echelle = \left[a_{11}^2 + (a_{21} \cdot a_{12}) \right]^{1/2}$		
Rotation : -62.1809-			
Matrice :	Les coefficients de la matrice permettent d'établir le système d'équations de la transformation euclidienne		
5.37041	10.1776	8.62997	
-10.1776	5.37041	7.62257	

Figure 28. Caractéristiques de la transformation (euclidienne dans l'exemple)

$$\text{Équations : } \begin{cases} \hat{U} = 5.37U + 10.17V + 8.62 \\ \hat{V} = -10.17U + 5.37V + 7.62 \end{cases}$$

À partir des équations ci-dessus, il est donc possible de calculer les nouvelles coordonnées et l'ajustement entre la surface image et la surface source aboutit à l'obtention de 3 ensembles de coordonnées :

- [XY] pour la surface source [Z] ;
- [UV] pour la surface image [W] ;
- [$\hat{U}\hat{V}$] pour la surface image ajustée [\hat{W}] ;

Dans un même tableau (figure 29), on trouve les coordonnées de la source et celles de l'image ajustée dénommées ici AdjustX et AdjustY ; les écarts entre les X et les \hat{U} (deltaX), et entre les Y et les \hat{V} (deltaY) ; la somme des carrés des écarts pour chaque point (dist²) ; la distance correspondant à ces écarts ou norme du vecteur de déplacement des points (dist) ; enfin, l'angle du vecteur de déplacement exprimé en radian.

Id	SourceX	SourceY	AdjustX	AdjustY	deltaX	deltaY	dist ²	dist	angle
1	0.00000	0.00000	-1.10890	3.74839	1.10890	-3.74839	15.2801	3.90898	-1.28317
2	1.50000	28.5000	-1.07015	27.5147	2.57015	0.985314	7.57651	2.75255	0.366087
3	5.00000	14.0000	6.62291	12.3731	-1.62291	1.62690	5.28063	2.29796	2.35497
4	17.5000	5.00000	19.9108	6.68815	-2.41081	-1.68815	8.66184	2.94310	-2.53071
5	22.5000	14.5000	22.1453	11.6757	0.354673	2.82433	8.10262	2.84651	1.44587

Figure 29. Coordonnées et déplacements des points homologues après ajustement

Plusieurs figures illustrent ces résultats :

- la carte des localisations de la surface source (figure 29a) ;
- la carte des localisations de la surface ajustée (figure 29b) ;
- la carte des vecteurs de déplacements des points entre les positions dans la source et sur la surface ajustée (figure 29c).

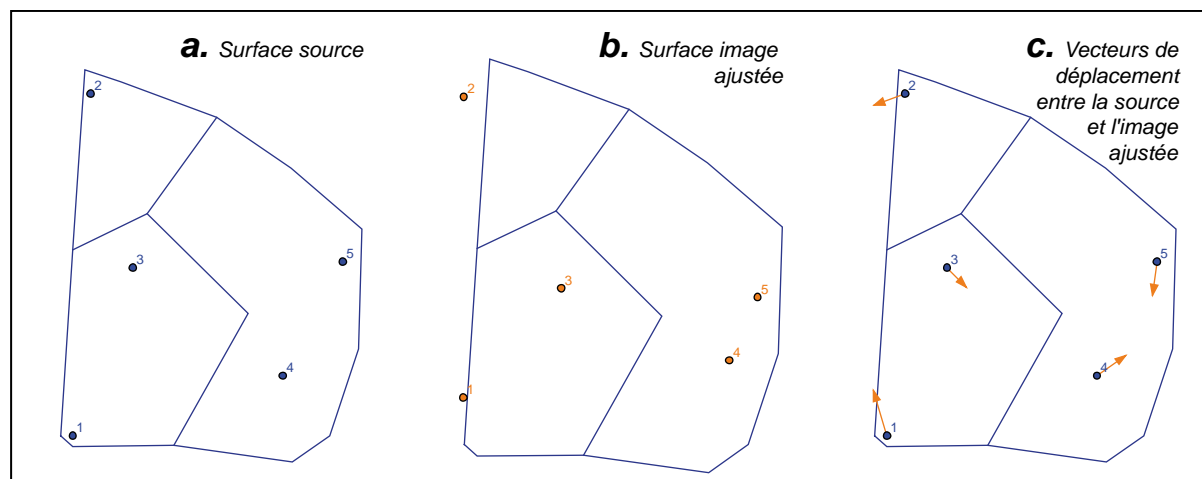


Figure 30. Principales cartes après ajustement

L'ajustement aboutit à des résultats statistiques globaux (figure 31) qui sont affichés en premier. Ils peuvent être recalculés manuellement, en calculant les diverses sommes, moyennes et variances de chaque série de coordonnées.

$$\text{– soit } dX^2 = (X - \hat{U})^2 \quad \text{et} \quad dY^2 = (Y - \hat{V})^2$$

- alors, $\Sigma (dX^2 + dY^2) = 16.408 + 28.489 = 44.897$
- $\Sigma (X - \bar{X})^2 + \Sigma (Y - \bar{Y})^2 = 407.3 + 474.7 = 882$
- alors, **R1** = $\{1 - [44.897 / 882]\} = .949$
- et **RMSE1** = $[44.897 / 5] = 2.996$ exprimé en unités du référentiel [XY]

AJUSTEMENT	
Transformation : Euclidienne	
R1 :	0.949091
R1x :	0.959718
R1y :	0.939973
RMSE1 :	2.99672
RMSE1x :	1.81146
RMSE1y :	2.38725

$$R1 = 1 - \left[\frac{\Sigma (\hat{W} - Z)^2}{\Sigma (Z - \bar{Z})^2} \right]$$

$$RMSE1 = \Sigma (\hat{W} - Z)^2 / N \text{ avec } N \text{ nombre de points homologues}$$

Figure 31. Résultats statistiques liés à l'ajustement

3.2. Résultats liés à l'étape d'interpolation

Trois ensembles de résultats peuvent être identifiés, qui seront présentés dans l'ordre suivant :

- les caractéristiques générales de l'interpolation ;
- les résultats associés aux nœuds de la grille ;
- les résultats liés aux points homologues.

3.2.1. Caractéristiques générales de l'interpolation

Les caractéristiques de l'interpolation comprennent (figure 32) :

- la finesse (ou précision) de l'interpolation donnée par le coefficient, α , retenu lors du choix des paramètres ;
- la résolution de la grille ou dimension de la maille carrée de base calculée en fonction de la zone et de la précision de l'interpolation ;
- les minimum et maximum en X et en Y de la grille d'interpolation. Cette zone correspond au plus petit rectangle englobant les points-source et les éléments pris en compte pour les illustrations ; ses côtés, exprimés dans les unités de la surface source, sont des multiples de la résolution de la grille.
- le nombre de lignes et de colonnes de la grille d'interpolation liée aux paramètres précédents ;

Grille	Paramètres de la grille	
Précision de la grille :	3.5	
Resolution :	3.660645643955755	
Nb columns :	9	Nb rows : 11
Min X :	-3.09258	Min Y : -4.15323
Max X :	26.1926	Max Y : 32.4532

Figure 32. Caractéristiques de la grille d'interpolation

Une figure des pondérations des nœuds de la grille peut être tracée (figure 33) qui indique clairement si les points sont bien répartis spatialement et, par suite, si l'interpolation est acceptable pour tous les secteurs de la surface étudiée. Précisons que dans le cas de l'exemple de 5 points, l'interpolation, si elle « tourne », est discutable car elle n'a pas grand sens étant donné le faible nombre de points pris en compte.

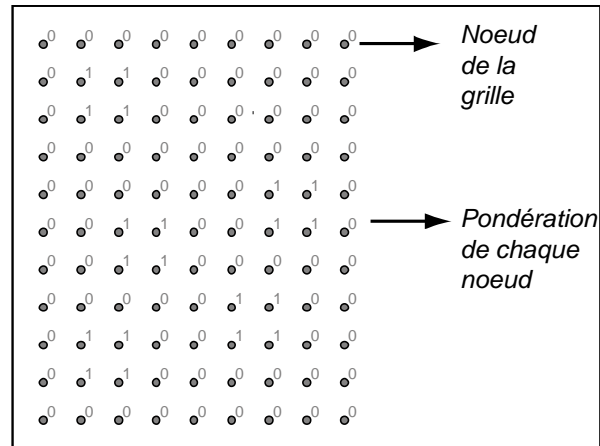


Figure 33. Pondération des nœuds

Les nouvelles échelles des axes X et Y qui traduisent globalement des étirements ou des contractions sont également indiquées (figure 34).

ScaleX :	1.0335210005225355	Echelle étirée
ScaleY :	0.8339050751312533	Echelle contractée

Figure 34. Nouvelles échelles des axes X et Y

3.2.2. Résultats associés aux nœuds de la grille

Les résultats associés aux nœuds de la grille sont les coordonnées des nœuds de la grille après interpolation selon les deux directions X et Y, appelées respectivement *Xinterp.* et *Yinterp.* (figure 35). Les coordonnées des nœuds avant et après interpolation ainsi que les poids des nœuds peuvent être récupérés en utilisant le clic droit de la souris sur la couche *nœud*, et en *exportant* ensuite en format *Texte*.

X interp.		Coordonnées X des nœuds de la grille interpolée – Valeurs des \hat{U}								
I\J	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	-5.54797	-1.84295	2.34797	6.64804	10.7940	14.7803	18.6592	22.4828	26.2807	
2	-5.46963	-2.32886	2.23879	6.80214	10.9536	14.8875	18.7145	22.5083	26.2952	
3	-4.74872	-1.03245	3.15417	7.36816	11.3305	15.1016	18.8029	22.5405	26.3133	
4	-3.96070	-0.02664	4.15011	8.14042	11.8531	15.3832	18.8829	22.5374	26.3209	
5	-3.32335	0.736473	5.11155	8.94657	12.4234	15.7037	18.9234	22.4052	26.3286	
6	-2.96245	1.184370	5.86476	9.53728	12.9306	16.1424	19.1257	22.1474	26.4763	
7	-2.96498	1.098700	5.42726	9.36399	13.2326	16.8658	20.1993	23.4459	27.1696	
8	-3.24783	0.748182	5.03293	9.26440	13.4696	17.5334	21.1790	24.2672	27.8033	
9	-3.74333	0.108955	4.57688	9.01613	13.3828	17.6223	21.4378	24.6405	28.1898	
10	-4.20677	-0.653976	4.21257	8.71526	13.0336	17.1676	21.0400	24.6674	28.3423	
11	-4.08245	-0.174758	4.21219	8.59880	12.8690	16.9746	20.8872	24.6470	28.3863	
Y interp.		Coordonnées Y des nœuds de la grille interpolée – Valeurs des \hat{V}								
I\J	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	30.6173	30.6571	30.3787	29.9381	29.5468	29.2364	28.9976	28.8263	28.7361	
2	27.5245	27.9218	27.4865	26.8322	26.4076	26.1060	25.8711	25.6867	25.5904	
3	24.0342	24.1417	23.9913	23.4926	23.1396	22.9031	22.6886	22.4539	22.3464	
4	20.4363	20.3345	20.0699	19.8055	19.6784	19.5983	19.4355	19.0903	18.9935	
5	16.9396	16.6891	16.1421	16.0537	16.1810	16.2566	16.1130	15.4771	15.5434	
6	13.6930	13.3399	12.4443	12.5920	12.9222	12.9923	12.4938	11.2625	12.1593	
7	10.7993	10.5330	9.96421	10.0316	10.3039	10.4525	10.1773	9.63052	9.67190	
8	8.17170	8.02863	7.69869	7.68405	7.90691	8.15171	7.99089	7.41029	7.22586	
9	5.68718	5.71118	5.34851	5.19554	5.26546	5.40461	5.27372	4.79383	4.59537	
10	3.19155	3.49012	2.76376	2.44401	2.32237	2.26059	2.12129	1.89589	1.76639	
11	0.12533	0.11174	-0.22757	-0.50559	-0.68058	-0.80589	-0.94506	-1.09796	-1.19210	

Figure 35. Coordonnées des nœuds de la grille d'interpolation

Au niveau des résultats associés aux nœuds, sont également stockées dans le fichier des résultats statistiques les valeurs des forces de déformation m_{ij} (figure 36) qui permettent d'établir la carte en isolignes de ces forces qui vont induire des rétrécissements ou des étirements de la surface (figure 37 b). La valeur de la force m_{ij} pour un nœud donné est égale à la racine carrée de la moitié de la somme des carrés des dérivées partielles du nœud⁷ ; sa formule est la suivante :

$$m_{ij} = \sqrt{m_{ij}^2} \quad \text{avec} \quad m_{ij}^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{\hat{d}u_{ij}^2}{dx_{ij}} + \frac{\hat{d}v_{ij}^2}{dx_{ij}} + \frac{\hat{d}u_{ij}^2}{dy_{ij}} + \frac{\hat{d}v_{ij}^2}{dy_{ij}} \right)$$

Distorsion		1	2	3	4	5	6	7	8	9
I\j	1	0.932416	0.932773	0.994936	1.016220	0.995059	0.972591	0.959076	0.954097	0.952746
	2	0.885535	0.977954	1.084180	1.054360	1.000180	0.969360	0.956486	0.956885	0.957239
	3	1.002820	1.081230	1.099730	1.052460	0.995520	0.959211	0.951144	0.966001	0.968252
	4	1.032640	1.078050	1.111420	1.046120	0.975987	0.936476	0.939847	0.985958	0.982953
	5	1.025080	1.067550	1.096540	1.001150	0.928936	0.898109	0.935225	1.042860	1.005200
	6	0.999593	1.046960	1.006480	0.898758	0.858352	0.828583	0.841504	0.913246	1.028300
	7	0.950753	0.963533	0.925271	0.891503	0.874049	0.830366	0.799155	0.797450	0.872300
	8	0.919783	0.931527	0.939743	0.940026	0.936416	0.893031	0.816520	0.803945	0.847316
	9	0.890884	0.925904	0.987929	0.991135	0.991963	0.964481	0.885723	0.845406	0.867326
	10	0.874031	0.977832	1.058460	1.016100	0.999498	0.980830	0.943134	0.906860	0.904059
	11	0.959766	1.037970	1.027360	1.012970	0.996357	0.976023	0.949528	0.927152	0.921259

Figure 36

La valeur de la distorsion totale M^2 et celle de M se trouvent attachées aux valeurs des indices globaux associés aux points homologues, dans le fichier de sortie et dans la fenêtre où s'affichent les résultats de l'interpolation. Ici, $M^2 = 91.4459$ et M , qui permet la comparaison des résultats quelle que soit la grille, est égal à 0.961091.

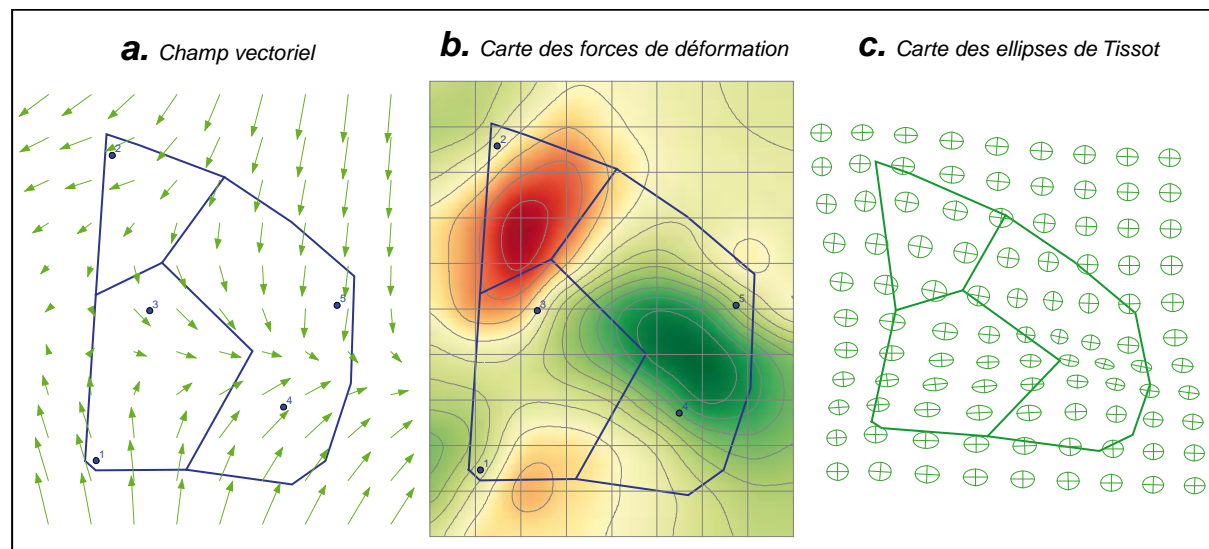


Figure 37. Cartes associées aux surfaces

3.2.3. Résultats liés aux points homologues

Statistiques et cartes s'associent pour donner des résultats très riches au niveau des points homologues, permettant de connaître tant les valeurs des indices globaux du modèle que les décalages, internes (ajustement-interpolation) et externes (source-interpolation), liés à l'interpolation.

⁷ Pour plus de détails sur ce point, voir [Cauvin C.,1984] ou [Cauvin C. et al., 2008, volume 4].

3.2.3.1. Résultats statistiques

Les résultats statistiques globaux sont stockés dans le fichier des résultats immédiatement après le titre interpolation. Ils comprennent des indices liés aux deux axes simultanément qui caractérisent le modèle (qualité du modèle et déplacement moyen) ainsi que des indices attachés à chaque axe (figure 38).

INTERPOLATION		
R2 :	1.00000	Qualité du modèle après interpolation (interpolation, ajustement, source)
R3 :	1.00000	Qualité de l'interpolation (interpolation-ajustement)
R3x :	1.00000	Qualité de l'interpolation selon l'axe X (interpolation-ajustement)
R3y :	1.00000	Qualité de l'interpolation selon l'axe Y (interpolation-ajustement)
		Déplacement moyen entre l'interpolation et l'ajustement
RMSE2 (interp - adjust) :	1.60426e-15	Déplacement moyen global (interpolation-ajustement)
RMSE2x :	1.59192e-15	Déplacement moyen selon l'axe X (interpolation-ajustement)
RMSE2y :	1.98603e-16	Déplacement moyen selon l'axe Y (interpolation-ajustement)
		Déplacement moyen entre l'interpolation et l'ajustement
RMSE4 (interp - source) :	2.99672	Déplacement moyen du modèle (interpolation-source)
RMSE4x :	1.81146	Déplacement moyen selon l'axe X (interpolation-source)
RMSE4y :	2.38725	Déplacement moyen selon l'axe Y (interpolation ajustement)

Figure 38. Résultats globaux liés à l'interpolation

3.2.3.2. Résultats cartographiques

Trois cartes attachées aux points homologues peuvent être produites (figure 39) :

- la carte déformée avec le contour modifié et les points déplacés après interpolation (ou anamorphose) ;
- la carte des vecteurs de déplacements entre les positions des points-source et celles des points interpolés ;
- la carte des vecteurs de déplacements entre les positions des points ajustées et celles des points interpolés.

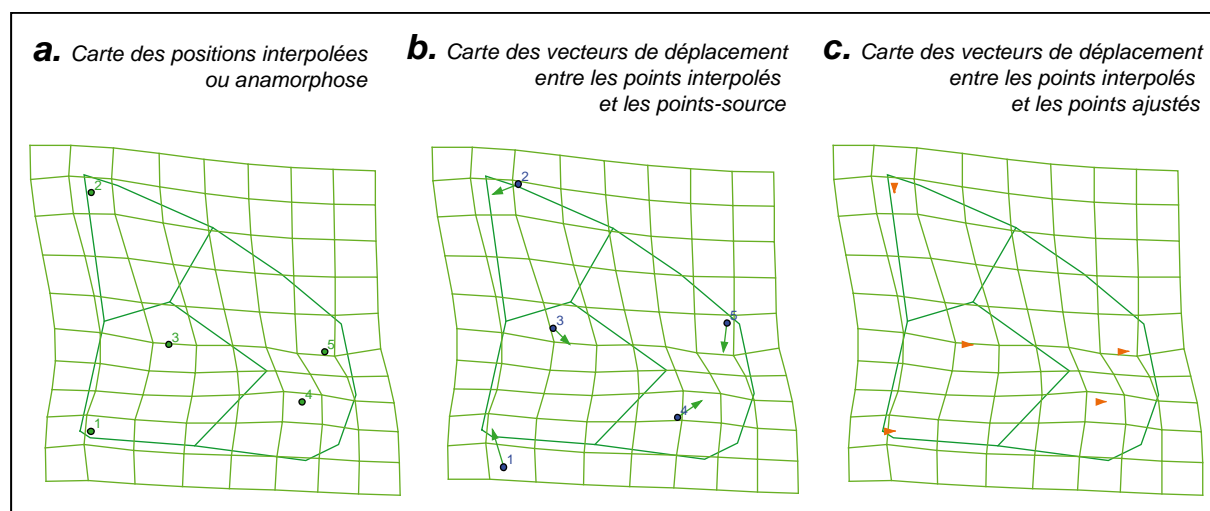


Figure 39. Cartes associées aux points homologues après interpolation

Les coordonnées correspondantes se trouvent dans un tableau numérique stocké dans le fichier statistique (figure 40). Ce dernier comprend les coordonnées des points-source, celles des points interpolés, ainsi que, pour chaque point, les écarts et les distances entre les deux positions.

Id	SourceX	SourceY	InterpX	InterpY	deltaX	deltaY	dist^2	dist	angle
1	0.00000	0.00000	-1.10890	3.74839	1.10890	-3.74839	15.2801	3.90898	-1.28317
2	1.50000	28.5000	-1.07015	27.5147	2.57015	0.985314	7.57651	2.75255	0.366087
3	5.00000	14.0000	6.62291	12.3731	-1.62291	1.62690	5.28063	2.29796	2.35497
4	17.5000	5.00000	19.9108	6.68815	-2.41081	-1.68815	8.66184	2.94310	-2.53071
5	22.5000	14.5000	22.1453	11.6757	0.354673	2.82433	8.10262	2.84651	1.44587

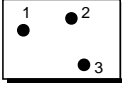

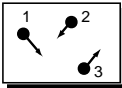
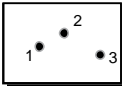
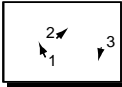
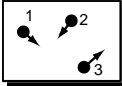
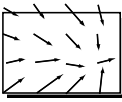

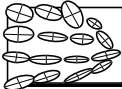
Figure 40. Résultats liés aux points homologues après interpolation

En ce qui concerne les ellipses de Tissot, il est possible d'obtenir des résultats numériques pour chaque nœud en cliquant sur la couche *Nœud* et en choisissant l'export en format *Texte* ainsi que nous l'avons signalé dans le paragraphe 2.2.2.1. On obtient pour chaque nœud, ses coordonnées après interpolation, l'angle de rotation de l'axe principal par rapport à l'axe de référence, et la longueur des deux axes de chaque ellipse.

Conclusion

Le logiciel Darcy permet d'appliquer une méthode de comparaison spatiale, très puissante, aux résultats tant graphiques que statistiques très abondants comme en témoigne la figure 41.

Il s'agit d'une méthode transthématique et même transdisciplinaire étroitement liée à chaque thème traité. En conséquence, les résultats doivent être interprétés soigneusement en fonction du sujet concerné, des hypothèses émises et des données entrées. Chaque indice doit être réfléchi, repensé en fonction du thème abordé. Ainsi, les conclusions liées à une étude en cognition spatiale diffèrent par leur signification disciplinaire de celles associées à une recherche en transport (accessibilité), en histoire (comparaison de cartes anciennes), en linguistique (variation spatiale des noms de famille, par exemple).

Figures	Résultats statistiques	Résultats cartographiques
Source Z ou Original (X_i et Y_i)	Variance de la surface originale	 Localisations originales (<i>référentiel</i>)
Image ajustée \widehat{W} (\widehat{U}_i et \widehat{V}_i)	Caractéristiques de la transformation ■ échelle ■ angle de rotation ■ équation	
	\widehat{W} et Z R1 (<i>indice de cohérence</i>) qualité de l'ajustement RMSE 1 (<i>indice de similitude, d'exactitude</i>) déplacement moyen après ajustement	 Localisations ajustées  Déplacements des lieux après ajustement
Image interpolée $\widehat{\widehat{W}}$ ($\widehat{\widehat{U}}_i$ et $\widehat{\widehat{V}}_i$)	$\widehat{\widehat{W}}$ et \widehat{W} R3 qualité de l'interpolation R2 (<i>indice de cohérence</i>) qualité du modèle après interpolation	 Localisations interpolées
	$\widehat{\widehat{W}}$ et \widehat{W} RMSE2 déplacement moyen entre image ajustée et image interpolée RMSE4 (<i>indice de similitude, d'exactitude</i>) déplacement moyen entre source et image interpolée	 Déplacements entre les localisations ajustées et interpolées  Déplacements des lieux après interpolation
Extension des résultats à l'ensemble de la surface Résultats pour tous les noeuds de la grille d'interpolation	Distorsion totale et moyenne (<i>indice de déformation</i>) Etirement : moyen, minimum et maximum (<i>indice de distorsion</i>)	 Champ vectoriel Déplacement des noeuds après interpolation  Lignes d'égal force de déformation en chaque point de la surface  Champ tensoriel = résultats des forces de déformation = Indicateur de Tisserot

C. Cauvin, 1984-2008

Figure 41. Tableau récapitulatif des résultats statistiques et graphiques obtenus avec le logiciel Darcy

Références bibliographiques

- D'ARCY THOMPSON W., 1917, 1948, *On growth and form*, MacMillan, New York, 1 116 p.
- D'ARCY THOMPSON W., 1994, *Forme et croissance*, Traduit par Teyssié D., Seuil, CNRS, Paris, 336 p.
- BRAUN J., 1994, *L'accessibilité au Luxembourg. Transport individuel et transport collectif, complémentarité ou concurrence ?* Mémoire présenté dans le cadre du stage pédagogique, Luxembourg, Strasbourg, 144 p.
- CAUVIN C., 1984, « Une méthode générale de comparaison cartographique : la régression bidimensionnelle », *Travaux et Recherches, ERA 214 (CNRS)*, Fascicule 4, Strasbourg, 130 p.
- CAUVIN C., REYMOND H. *et al.*, 1986, *Nouvelles méthodes en cartographie*, Collection RECLUS Mode d'Emploi, Maison de la Géographie, Montpellier, 56 p.
- CAUVIN C., 1995a, « Cartographie théorique et anamorphoses », *17th International Cartographic Conference*, vol. II, Septembre 95, Barcelone, 7 p.
- CAUVIN C., 1995b, « Transformações cartograficas espaciais e anamorfas ». Chapitre 7, dans *Os mapas em Portugal. Da tradiçao aos novos rumos da Cartografia*. Edições Cosmos, Lisboa, p. 269-310
- CAUVIN C., 1996, « Cartographie théorique et anamorphoses », *Comité Français de Cartographie*, Bulletin n° 146-147, p. 82-88.
- CAUVIN C., 1998, « Des transformations cartographiques », *Mappemonde*, n° 49, p. 12-15.
- CAUVIN C., ESCOBAR F., SERRADJ A., 2008, *Cartographie thématique 4. Des transformations renouvelées*, Hermès Editions, Paris, 198 p.
- TOBLER W.R., 1965, « Computation of the correspondance of geographical patterns », *Papers of the Regional Science Association*, vol. 15, p. 131-139.
- TOBLER W.R., 1966, « Medieval distortions : the projections of Ancient Maps », *Annals of the Association of American Geographers*, vol. 56, p. 351-361.
- TOBLER W.R., 1977, « Bidimensional regression: a complete program », Santa Barbara, CA, 71 p. ronéotées.
- TOBLER W.R., 1978, « Comparisons of plane forms », *The Geographical Analysis*, vol. X, n° 2, p. 154-162.
- TOBLER W.R., 1994, « Bidimensional regression: a complete program », *Geographical Analysis*, vol. 26, n° 3, p. 187-212.

