

# Cartographie numérique des sols à l'échelle stationnelle : cas des sols de basfonds de la ville de Daloa en Côte d'Ivoire

Ferdinand Gohi Bi ZRO<sup>1\*</sup>, Arthur Brice KONAN-WAIDHET<sup>2</sup>, Kouakou Hervé KOUASSI<sup>2</sup> et Fernand Koffi KOUAME<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Université Jean Lorougnon Guédé, UFR Agroforesterie, Département Sciences du Sol et Agrosystèmes, BP 150 Daloa, Côte d'Ivoire <sup>2</sup> Université Jean Lorougnon Guédé, UFR Environnement, Département Sciences de la Terre, BP 150 Daloa, Côte d'Ivoire <sup>3</sup> Université Félix Houphouët-Boigny, UFR Sciences de la Terre et des Ressources Minières, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

\* Correspondance, courriel : *zraubigof@yahoo.com* 

# Résumé

L'objectif de cette étude est de tester une méthodologie de cartographie automatique simplifiée des sols de bas-fonds. Pour cela, une base de données constituée de mesures des altitudes de ces sols a été réalisée pour la ville de Daloa en Côte d'Ivoire. Ces données ont permis, sous le SIG ARCGIS 9.3, d'élaborer un modèle prédictif de l'étendue des sols recherchés. Ce modèle prédictif a été calibré à partir des caractéristiques topographiques de 3391 pixels d'apprentissage. La précision globale qui en est ressortie ou précision interne du modèle est de 81,86 %. Après extrapolation à l'ensemble du périmètre d'étude, la précision globale ou précision externe du modèle calculée à partir de 3100 données ponctuelles d'observations de terrain indépendantes du modèle est égale à 77,61 %. Par ailleurs, il est ressorti une correspondance parfaite entre les positions géographiques des sols étudiés sur la carte réalisée et sur la scène LC81970552017005LGL01 de l'image LANDSAT 8 OLI\_TIRS utilisée comme référence. Ainsi, on est arrivé à la conclusion que la méthodologie employée est fiable et mérite donc d'être considérée dans les processus de cartographie des sols de bas-fonds à l'échelle stationnelle.

Mots-clés : cartographie automatique, SIG, sols, échelle stationnelle, Daloa.

## Abstract

# Digital Soil mapping to the station scale : case of lowland soils of the City of Daloa in Côte d'Ivoire

The objective of this study is to test a methodology for simplified automatic mapping of lowland soils. For this, a database consisting of measurements of the altitudes of these soils was made for the city of Daloa in Côte d'Ivoire. These data have permit, using ARCGIS 9.3 SIG, to develop a predictive model of the extent of the studied soils. This predictive model has been calibrated with the topographic features of 3391 pixels of learning. The resulting overall accuracy or internal precision of the model is 81.86 %. After extrapolation to the entire study area, the overall accuracy or external precision of the model calculated with 3100 data

independent of the model is equal to 77.61 %. In addition, we noticed a perfect match between the geographical positions of the soils studied on the map realized and the LC81970552017005LGL01 scene of the LANDSAT 8 OLI\_TIRS image used as reference. Thus, it has been concluded that the methodology used is reliable and therefore deserves to be considered in the station scale mapping processes of lowland soils.

Keywords : automatic mapping, GIS, soils, station scale, Daloa.

# 1. Introduction

Les démarches classiques de cartographie des sols [1] sont basées sur des observations directes des sols regroupées en unités cartographiques et/ou unités typologiques de sol par expertise. Ces méthodes se heurtent au coût de mise en œuvre quand il s'agit de couvrir de vastes territoires. En plus, elles sont peu reproductibles. Ces méthodes sont donc limitées. Ainsi, depuis quelques années, la Cartographie Numérique des Sols (CNS) complète de façon opérationnelle la cartographie classique des sols. En effet, sans remplacer les observations de terrain, la CNS permet de produire, quelle que soit l'échelle de travail, une information homogène assortie d'une estimation des incertitudes, de façon documentée et répétable [2 - 4]. Les techniques de CNS sont nombreuses. Elles sont basées d'une part sur l'interpolation des observations ponctuelles des sols (statistiques, géostatistiques) sur l'ensemble de la couverture pédologique étudiée et d'autre part sur les relations sol-paysage [4]. Les relations entre le sol et les facteurs de formation des sols sont connues de longue date et ont été très largement prises en compte pour cartographier les sols. Tout d'abord formalisées [5], ces relations ont été généralisées par l'approche Scorpan [6] qui fournit un cadre conceptuel aux études de CNS.

L'approche Scorpan fait référence aux sept facteurs de formation des sols, qui sont : s ou sol (mesures précédentes, autres paramètres pédologiques que celui qui est à prédire), c ou climat, o ou organismes vivants (faune, végétation, activités humaines), r ou relief, p ou matériau parental, a ou facteur temps et n ou position dans l'espace, qui permettent de prédire une classe de sol ou un paramètre pédologique. En somme, la CNS est une activité aussi délicate que les méthodes classiques de cartographie des sols : elle est de nature multidimensionnelle et interdisciplinaire et, ainsi, elle nécessite la définition de plusieurs critères d'importances différentes et la manipulation d'une quantité considérable de données quantitatives et/ou qualitatives. Toutefois, pour une surface relativement réduite à couvrir (échelle stationnelle), la CNS peut être rendue facile si l'opérateur arrive à faire un choix judicieux d'un nombre peu élevé de critères, permettant ainsi de réduire la quantité des données à manipuler. En effet, les facteurs de formation des sols auxquels la CNS fait référence peuvent s'avérer spatialement peu différents et alors, seulement les facteurs qui varieront significativement d'un point à un autre, seront les plus pertinents pour prédire les classes des sols. C'est dans ce cadre que la présente étude a été initiée. Elle vise à développer une méthode simple de CNS basée sur le choix d'un nombre très limité de critère pour prédire la répartition spatiale des sols de bas-fonds à l'échelle de la ville de Daloa.

# 2. Matériel et méthodes

## 2-1. Cadre physique de la zone d'étude

La ville de Daloa qui a servi de cadre à la réalisation de cette étude couvre une superficie de 54,33 km<sup>2</sup>. Cet espace est situé au centre ouest de la Côte d'Ivoire, pays de l'Afrique de l'ouest, précisément entre les longitudes 6,48° et 6,41°Ouest et les latitudes 6,91° et 6,84°Nord *(Figure 1)*. Le régime climatique de la

zone est celui du domaine Guinéen caractérisé par un régime équatorial et subéquatorial à deux maxima pluviométriques [7]. Le relief y est peu contrasté et peu varié et dominé par des plateaux de 200 à 400 m d'altitude [8]. Les formations géologiques qui couvrent la région administrative du Haut-Sassandra dont Daloa est le Chef-lieu sont celles du Précambrien moyen dominées essentiellement par les granites. Les sols y sont en général ferralitiques moyennement lessivés [9].



Figure 1 : Carte de localisation de la zone d'étude ([10] modifié).

## 2-2. Matériel et données

Pour réaliser cette recherche, deux types de données ont été utilisés. Il s'agit, d'une part, de la carte topographique réalisée à l'échelle 1/25000 [11] qui a permis d'extraire les courbes de niveau en vue de l'élaboration du Modèle Numérique de Terrain (MNT) de la zone d'étude. L'équidistance entre ces courbes de niveau est de 5 m. D'autre part, l'image OLI\_TIRS du satellite LANDSAT 8 datant du 05/01/2017 a été utilisée pour réaliser des compositions colorées d'images en vue de la mise en évidence des composantes homogènes au sol de la zone d'étude. Il s'agit, plus précisément, de la scène LC81970552017005LGL01 téléchargée sur le site internet earthexplorer.usgs.gov. Cette image était déjà prétraitée par le fournisseur qui est la National Aeronotics and Space Administration (NASA). Elle couvre un large domaine spectral (11 bandes) qui s'étend du visible à l'infrarouge thermique. Ici, seules les bandes du visible et du proche infrarouge ont été utilisées, soit au total six bandes. Chacune de ces bandes a une résolution spatiale de 30 m. Ces données ont été traitées respectivement grâce aux logiciels ENVI 4.7 et ArcGIS 9.3. Par ailleurs, un GPS Garmin 12 a été utilisé pour les opérations de géoréférencement et de délimitation des parcelles d'entraînement.

## 2-3. Méthodes

#### 2-3-1. Cartographie automatique des sols de bas-fonds

Le modèle conceptuel de données mis en place pour cartographier les sols de bas-fonds est schématisé par la *Figure 2*. Seul le critère d'altitude ou de relief a été retenu car les zones des plus faibles altitudes correspondent en général aux bas-fonds. Dans la pratique, les altitudes de la zone d'étude ont été extraites par digitalisation des courbes de niveau, à partir de la carte topographique utilisée, grâce à la fonction ArcMap du logiciel ArcGIS 9.3. Le fichier vectoriel des altitudes ainsi élaboré a été discrétisé pour obtenir des points côtés. Ces points ont été interpolés par la méthode du "plus proche voisin" en vue de l'élaboration du Modèle Numérique de Terrain (MNT). Sur ce MNT, la taille du pixel a été fixée à 2,5 m conformément à certaines recherches [12]. Selon ces travaux, la résolution spatiale d'un MNT correspond à la moitié de l'équidistance sur la carte topographique qui a servi de base à sa réalisation. A partir du MNT réalisé, la cartographie des sols de bas-fonds a été obtenue suite à une reclassification des altitudes selon les conditions de terrain déterminées au cours du processus d'apprentissage.



Figure 2 : Modèle conceptuel de données en vue de la cartographie des sols de bas-fonds

Cet apprentissage réalisé sur six sites (Commerce, Corridor d'Issia, Huberson, Labia, Lobia et Tazibouo) répartis dans différents secteurs de la zone d'étude *(Figure 3)* a consisté essentiellement à mesurer les altitudes des sols en général. Au total, douze parcelles d'entraînement, soit deux parcelles par site, ont été délimitées à l'aide du GPS Garmin 12 utilisé. La répartition des parcelles d'apprentissage dans divers secteurs de la zone d'étude permet d'éviter que les noyaux constitués ne représentent qu'un seul type de région [13, 14]. Ici, chacune d'elle couvrait entre 250 et 500 m<sup>2</sup> selon que le site prospecté présentait une morphologie de plus en plus hétérogène. Le nombre de points de mesures des altitudes, fixé à au moins trois par site, croissait aussi avec cette hétérogénéité.



Figure 3 : Carte de répartition spatiale des parcelles d'entraînement

#### 2-3-2. Validation de la cartographie réalisée

La carte obtenue a été validée en utilisant, d'une part, deux groupes différents de pixels d'apprentissage. Le premier groupe de pixels avait servi à calibrer le modèle prédictif. Ces pixels ont servi aussi à estimer sa précision interne : il s'agissait de vérifier que ces pixels ont été classés effectivement par le modèle comme des sols de bas-fonds. On a ainsi obtenu la précision alobale du modèle, les erreurs d'excédents ou de commissions et de déficits ou d'omissions, ainsi que les précisions pour le réalisateur et pour l'utilisateur. Le modèle a été jugé précis lorsque les indices calculés sont avérés, dans l'ensemble, supérieurs à 70 % [14]. Cela a laissé présager de bonnes statistiques au niveau de la précision externe du modèle qui, elle, a été déterminée à partir de la seconde source de données constituée par les pixels d'apprentissage qui n'avaient pas servi à calibrer le modèle. La méthode de calcul appliquée est identique à celle qui a permis d'estimer la précision interne du modèle. D'autre part, plusieurs compositions colorées de bandes (bandes 1-2-3, 2-3-4, 2-1-4, 3-4-5 et 2-1-4) de l'image OLI\_TIRS du satellite LANDSAT 8 ont été réalisées sous ENVI 4.7 pour faire une synthèse des informations contenues dans l'image et permettre une distinction plus nette des différentes composantes homogènes au sol. La composition colorée ayant permis une meilleure distinction des zones humides qui correspondent en général aux zones de bas-fonds recherchées a été retenue pour être comparée visuellement à la carte issue du modèle. Pour ce faire, les deux cartes ont été disposées côte à côte en vue de l'appréciation de la correspondance entre les positions géographiques et l'étendue des classes correspondant aux sols de bas-fonds.

## 3. Résultats

#### 3-1. Caractéristiques altitudinales et répartition spatiale des classes de sol

Les courbes de niveau extraites de la carte topographique utilisée sont présentées sur la *Fgure 4.* Il s'agit des courbes directrices, qui permettent en général de faciliter la lecture des altitudes. Elles sont plus resserrées dans les zones périphériques de l'aire d'étude, notamment la partie ouest. Les points côtés qui en sont ressortis *(Figure 5)* sont également plus resserrés dans cette même partie de la zone d'étude. Les classes de sol obtenues suite à l'interpolation des points sont décrites, quant à elles, par la carte de *Figure 6.A*, qui a une précision de 2,5 m. Cette carte montre que, d'un côté, l'ensemble constitué par les sols dont les altitudes varient de 230 à 240 m, puis de 240 à 250, qui sont en général des sols de bas-fonds (gleysols et rédoxisols), couvre environ 40 % de l'espace d'étude, principalement le long de sa périphérie est, sud-est et nord-ouest. De l'autre côté, les sols dont les altitudes varient de 250 à 260 m et 260 à 285 m, sont en général secs. Ils correspondent, dans cet ordre, aux sols des versants et sols des plateaux. Ces deux classes de sol couvrent ensemble 60 % de l'espace d'étude. La composition colorée bleu-vert-rouge de l'image satellitaire LANDSAT 8 OLI utilisée comme référence *(Figure 6.B)* fait ressortir également la répartition spatiale des sols de la zone d'étude. Cette répartition spatiale, notamment la position géographique des sols de bas-fonds, concorde très bien avec celle apparaissant sur la *Figure 6.A*.



Figure 4 : Courbes de niveau extraites



Figure 5 : Points côtés



**Figure 6 :** Carte des sols de la zone d'étude issue du modèle (A) et composition colorée bleu-vert-rouge de l'image satellitaire LANDSAT 8 OLI couvrant la zone d'étude (B)

## 3-2. Indices de précision du modèle élaboré

La matrice de confusion illustrée par le *Tableau 1* permet d'évaluer la qualité statistique des noyaux (ROIs) élaborés, dont les caractéristiques topographiques ont servi à calibrer le modèle. Sur un total de 3391 pixels, 2776 ont été bien classés (somme des valeurs en gras dans le tableau). Ce résultat correspond à une précision globale de 81,86 %. Dans le détail, les zones sèches ont été prédites avec une précision de 81,87 % pour le réalisateur : 81,87 % des pixels des zones sèches qui ont été classés ont été effectivement considérés comme tels par le modèle ; les autres pixels, soit 18,13 % ont été omis. La précision pour l'utilisateur de cette classe est de 79,91 %, ce qui traduit que 20,09 % des pixels affectés à la classe sont en réalité des sols de bas-fonds. Concernant ces sols de bas-fonds qui étaient recherchés, les précisions pour le réalisateur et pour l'utilisateur sont respectivement de 81,85 et 83,66 %. Toutefois, 18,15 % des pixels d'apprentissage appartenant à cette classe ont été omis. Le *Tableau 2* fait la synthèse des statistiques de précision externe du modèle. Les indices calculés, à savoir, la précision globale, la précision pour le

réalisateur et la précision pour l'utilisateur sont, dans l'ordre : 77,61, 81,66 et 96,45 %. La proportion des pixels omis au niveau des sols de bas-fonds est de 25,71 % alors qu'au niveau des sols des versants et des plateaux, cette erreur ne concerne que 18,34 % des pixels. Les erreurs de commission qui traduisent les taux de surestimation au niveau des classes sont égalent à 3,55 % pour les sols de bas-fonds et 27,76 % pour la classe des sols constituée des sols des versants et des plateaux. Le modèle tend donc à surestimer les sols des versants et des plateaux.

		Pixels de référence (vérité terrain)					
		Zones sèches	Zones de bas-fonds	Total	Précision utilisateur (%)	Erreur de commission (%)	
Pixels affectés (classification)	Zones sèches	1301	327	1628	79,91	20,09	
	Zones de bas-fonds	288	1475	1763	83,66	16,34	
	Total	1589	1802	3391			
	Précision réalisateur (%)	81,87	81,85				
	Erreur d'omission (%)	18,13	18,15				
	Précision globale (%)		81,86				

Tableau 1 : Indices de précision interne du modèle prédictif

 Tableau 2 : Indices de précision externe du modèle prédictif

		Pixels de référence (vérité terrain)					
		Zones sèches	Zones de bas-fonds	Total	Précision utilisateur (%)	Erreur de commission (%)	
Pixels affectés (classification)	Zones sèches	1140	438	1578	72,24	27,76	
	Zones de bas-fonds	256	1266	1522	96,45	3,55	
	Total	1396	1704	3100			
	Précision réalisateur (%)	81,66	74,29				
	Erreur d'omission (%)	18,34	25,71				
	Précision globale (%)	77,61					

# 4. Discussion

174

La mise en œuvre des techniques de cartographie numérique des sols (CNS) [2 - 4] a permis d'établir une procédure simplifiée de prédiction de l'extension des sols de bas-fonds de la ville de Daloa. Pour ce faire, une base de données constituée des altitudes des sols de la zone d'étude a été constituée par apprentissage. Les autres facteurs de formation des sols en général [6] notamment, le climat, les organismes vivants et le matériau parental ne sont pas apparus pertinents pour cartographier les sols recherchés. Lors du processus d'apprentissage, toute la diversité des contextes d'altitudes de la zone

d'étude a été couverte en positionnant dans plusieurs parties de la région étudiée les noyaux (ROIs) dont les caractéristiques topographiques doivent servir à calibrer et à valider le modèle. Cela permet de bien renseigner les modèles en général [15]. Ainsi, les précisions interne et externe globales du modèle réalisé qui sont estimées à 81,86 et 77,61 % sont avérées satisfaisantes par référence aux performances enregistrées aux cours de plusieurs travaux similaires [14, 16 - 18]. La bonne performance du modèle s'est traduite aussi par une bonne concordance entre les classes de sol mises en évidence par le modèle et celles de références de l'image OLI\_TIRS du satellite LANDSAT 8 utilisée. Outre le mode spatialisation des noyaux adopté, les bonnes performances enregistrées dans ce travail sont dues également à un ensemble de dispositions pratiques qui ont été observées, en particulier :

- l'utilisation d'un nombre peu élevé de données discriminantes, sinon d'une seule de ces données, ce qui a simplifié l'interprétation des unités cartographiques obtenues et réduit considérablement les risques d'erreur [19];
- et l'utilisation d'une donnée altimétrique (MNT) très précise (2,5 m de résolution spatiale) [15].

Aussi, la relative étroitesse de la superficie de la zone géographique couverte par l'étude (54,33 km<sup>2</sup> correspondant à une échelle stationnelle) permet-elle d'obtenir en général une bonne précision des cartes [19]. En somme, la méthodologie adoptée est simple et bien renseignée. Ainsi, elle peut être reproduite assez facilement. Elle peut également être mise à jour et complétée avec de nouvelles données pédologiques ou variables environnementales en vue, non seulement de préciser la présente cartographie réalisée, mais encore, de faire des prédictions sur d'autres thématiques relatives aux sols étudiés. Toutefois, sa réalisation nécessitant un gros travail de digitalisation fait que sa mise en œuvre peut se révéler très périlleuse sur des zones morphologiquement hétérogène et/ou spatialement très étendue. Aussi, la tendance du modèle à surestimer les sols des versants et des plateaux qui a été observée dérive-t-elle du fait que sur ces sols, la densité des sites observés était plus faible relativement à celle sur les sols de bas-fonds qui constitue le centre d'intérêt de cette recherche [20].

## 5. Conclusion

Dans la présente recherche, l'objectif était de développer une méthode simple de cartographie automatique des sols de bas-fonds de la ville de Daloa. Pour ce faire, le critère d'altitude a été utilisé. Le résultat obtenu montre que les sols de bas-fonds recherchés et, avec eux, les sols des versants et des plateaux, ont été bien cartographiés à l'échelle de la ville. La méthode appliquée constitue donc un apport intéressant à la cartographie des sols en général. Cependant, il a été observé qu'elle tend à surestimer les sols des versants et des plateaux, d'où toute la nécessité de procéder à son ajustement. Il s'agira principalement d'augmenter le nombre d'observations sur ces sols des versants et des plateaux qui ont été moins bien cartographiés. Malgré cette insuffisance, la méthode développée reste fiable et devra être considérée dans les processus de cartographie des sols à l'échelle stationnelle.

# Références

- J. P. LEGROS, Cartographie des sols. Editions Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne (Suisse), (1996) 321 p.
- [2] P. LAGACHERIE, D. ARROUAYS et C. WALTER, Cartographie numérique des sols : principe, mise en œuvre et potentialités. Etude et Gestion des Sols, Vol. 20, 1 (2013) 83 - 98
- [3] C. GOMEZ, P. LAGACHERIE, S. BACHA, Using Vis-NIR hyperspectral data to map topsoil properties over bare soils in the Cap-Bon Region, Tunisia. *In*: Minasny, B., Malone, B., McBratney, A.B. (eds.), Digital Soil Assessment and Beyond. Taylor & Francis, London, (2012) 387 - 392
- [4] E. DOBOS, F. CARRÉ, T. HENGL, H. I. REUTER, G. TÓTH, Digital Soil Mapping as a support to production of functional maps. EUR 22123 EN. Office for Official Publications of the European Communities, Luxemburg, (2006) 68 p.
- [5] H. JENNY, Factors of Soil Formation, A System of Quantitative Pedology. McGraw-Hill, New York, (1941) 281 p.
- [6] A. B. MCBRATNEY, M. L. MENDONÇA SANTOS, B. MINASNY, On digital soil mapping. Geoderma, 117 (2003) 3 - 52
- Y. T. BROU, Variabilité climatique, déforestation et dynamique agrodémographique en Côte d'Ivoire. Sécheresse, 21 (1e) (2010) 1 - 6
- [8] J. M. AVENARD, Aspect de la géomorphologie in : Milieu naturel de Côte d'Ivoire. Mémoire ORSTOM, Paris, France, 50 (1971) 8 - 73
- B. DABIN, N. LENEUF et G. RIOU, Carte pédologique de la Côte d'Ivoire au 1/2.000.000. Notice explicative. ORSTOM, (1960) 39 p.
- [10] ANONYME, Atlas de Daloa, (Daloa, Côte d'Ivoire), (2007) 12 p.
- [11] BNETD, Daloa : vue aérienne-image QuickBird, (2006) 49 60
- [12] A. ROULLE, S. AUCLAIR, T. DEWEZ, A. HOHMANN, A. LEMOINE et J. REY, Cartographie automatique des classes de sol à l'échelle régionale à partir d'un modèle numérique de terrain ou de surface. Rapport final des projets de Service public du BRGM 2009 (09RISG07), (2010) 68 p.
- [13] F. G. B. ZRO, V. KOTCHI, D. SORO, C. K. NIANGORAN, B. SIDIKY et F. K. KOUAME, Intégration de données topographiques et hydrographiques en vue de la localisation des zones humides potentielles de fond de vallée : cas d'un périmètre de la région du Bélier en Côte d'Ivoire. *Physio-Géo*, Vol. 8, (2014) 231 - 248
- [14] B. LEMERCIER, M. LACOSTE, M. LOUM, C. WALTER, Using boosted classification tree-based models to extrapolate at regional scale local knowledge embedded in detailed soil maps : a two-step approach. *Geoderma*, 171 - 172 (2012) 75 - 84
- [15] C. GRINAND, D. ARROUAYS, B. LAROCHE, M. P. MARTIN, Extrapolating regional landscapes from an existing soil map : sampling intensity, validation procedures, and integration of spatial context. *Geoderma*, 143 (2008) 180 - 190
- [16] B. LEMERCIER, M. LACOSTE, M. LOUM, L. BERTHIER, A. L. LE BRIS et C. WALTER, Apport à la cartographie numérique des sols pour prédire l'hydromorphie et l'extension des zones humides potentielles à l'échelle régionale. *Étude et Gestion des Sols*, Vol. 20, N° 1 (2013) 47 66
- [17] M. LACOSTE, B. LEMERCIER, C. WALTER, Regional mapping of soil parent material by machine learning based on punctual training data. *Geomorphology*, 133, 1-2 (2011) 90 99
- [18] S. GRUNWALD, Multi-criteria characterization of recent digital soil mapping and modeling approaches. *Geoderma*, 152 (2009) 195 207
- [19] J. P. LEGROS et M. BORNAND, Système d'informations géographiques et zonage agro pédologique. In: Le zonage agro-climatique, Édit. INRA, Montpellier, (1989) 101 - 115
- [20] M. DI SALVO, M. GADAIS, G. ROCHE-WOILLEZ, L'estimation de la densité par la méthode du noyau, Méthodes et outils, (2005) 28 p.