

Support de cours

Systèmes d'Information Géographique (ENV-342)

Stéphane Joost
Gabriel Kathari

Groupe d'Epidémiologie Moléculaire Géospatiale (GEOME)
Laboratoire de Biologie Géochimique (LGB)

TABLE DES MATIÈRES

1	LA MODELISATION SPATIALE	7
1.1	De la réalité géographique à ses modèles	7
1.2	Approche systémique	8
1.3	Catégories de modèles	9
1.4	La modélisation cartographique	9
1.5	Modèles d'appréhension de l'espace	11
1.6	Concepts spatiaux fondamentaux	12
1.6.1	Échelle cartographique – Échelle d'observation	12
1.6.2	Géoréférencement : positionnement et projections	13
1.6.3	Systèmes de projection	13
1.6.4	Le positionnement	16
1.6.5	Les relations spatiales	16
1.6.6	Notion de topologie	17
1.7	Unité d'observation	19
1.7.1	Définitions et propriétés	19
1.7.2	Unités spatiales irrégulière et régulière, leurs dimensions	20
1.8	L'information spatiale et ses propriétés	23
1.8.1	Échelle de mesure de l'information spatiale	23
1.8.2	L'information mesurée ou primaire, dérivée et interprétée	24
1.9	Métadonnées ou méta-information	24
2	LE RELIEF – MODELES NUMERIQUES D'ALTITUDE ET CARACTERISTIQUES DERIVEES	27
2.1	Le relief, sa mesure et sa description	27
2.2	Les représentations du relief	27
2.3	Les modèles numériques d'altitude	28
2.4	Modes d'acquisition de l'altitude	30
2.4.1	Niveau de référence de l'altitude	30
2.4.2	Levé topographique par triangulation	30
2.4.3	La photogrammétrie	31
2.4.4	Radargrammétrie	32
2.4.5	Altimétrie par « laser à balayage » (LIDAR)	34
2.5	Quelques sources de MNA	36
2.5.1	MNA à basse résolution	36
2.5.2	MNA à haute résolution	37
2.6	Transformations et représentation d'un MNA	38
2.6.1	Création de classes d'altitude	38
2.6.2	Changement de résolution	39
2.7	Géomorphométrie : approche globale	40
2.7.1	Indicateurs globaux	40
2.8	Géomorphométrie – Approche locale	41
2.8.1	Calcul des variables par fenêtre mobile	41
2.8.2	Variables du relief dérivées	42
2.9	Variables thématiques dérivées	45
2.9.1	Visibilité	45
2.9.2	Ombre portée et ombre projetée	46
2.9.3	Taux d'ensoleillement	47
2.9.4	Ligne de drainage	48

3	PHENOMENES SPATIAUX DISCONTINUS	50
3.1	Coefficient d'autocorrélation ou indice I de Moran : définition et nature de l'indice	50
3.2	Test de significativité statistique	51
3.3	Indicateurs locaux d'arrangement spatial - LISA	52
3.4	Commentaire	55
4	PHENOMENES SPATIAUX CONTINUS	57
4.1	De l'échantillonnage à la régionalisation	57
4.1.1	Définitions - Notations	57
4.1.2	Rappels statistiques	58
4.2	Procédures d'échantillonnage spatial	59
4.2.1	Échantillonnage spatial aléatoire ou systématique	59
4.2.2	Propriétés statistiques du domaine échantillonné	60
4.3	Méthodes d'interpolation déterministes	60
4.3.1	Méthodes globales	61
4.3.2	Méthodes d'interpolation locales	62
4.3.3	Méthode par réseau de triangles (TIN)	62
4.3.4	Interpolation par moyenne mobile pondérée (<i>Inverse Distance Weighting</i>)	63
5	REQUETES SPATIALES	67
5.1	Requête et nature de la base de données géographique	67
5.2	Principes, catégories et exigences des interrogations	68
5.2.1	Principe de la requête SQL	68
5.2.2	Typologie des requêtes	68
5.2.3	Niveaux de complexité d'une requête	69
5.2.4	Nature des entrées et des sorties	69
5.2.5	Modes de création de requêtes	70
5.3	Requêtes thématiques	71
5.3.1	Opérateurs de comparaison	73
5.3.2	Opérateurs arithmétiques	74
5.3.3	Opérateurs logiques	74
5.3.4	Opérateurs statistiques	76
5.4	Requêtes géométriques	77
5.4.1	Position	77
5.4.2	Longueur et aire	78
5.4.3	Distance	79
5.5	Requêtes topologiques	79
5.5.1	Modèle topologique	79
5.5.2	Opérateurs topologiques	80
6	MANIPULATION DE DONNEES GEOSPATIALES AVEC PYTHON	85
6.1	Les bases de Python pour une utilisation avec les SIG	85
6.1.1	Les types natifs (nombres, booléens, chaînes de caractères, types séquentiels)	85
6.1.2	Les opérateurs	88
6.1.3	Les structures conditionnelles	89
6.1.4	Les boucles	92
6.1.5	Les dictionnaires	93
6.1.6	Les classes	94
6.1.7	Les librairies	96
6.2	La console Python dans QGIS	96
6.3	Les classes et méthodes <code>qgis.core</code> utiles	98
6.3.1	<code>QgsProject</code>	98
6.3.2	<code>QgsVectorLayer</code>	98
6.3.3	<code>QgsRasterLayer</code>	100

7	CARTOGRAPHIE THEMATIQUE	102
7.1	Les composantes et fonctions de la carte	102
7.1.1	Cartographie	102
7.1.2	Les différents types de cartes.....	102
7.1.3	Les composantes de la carte	103
7.1.4	Les fonctions de la carte	104
7.2	Les variables visuelles	104
7.2.1	La graphique.....	105
7.2.2	Les structures visuelles.....	105
7.2.3	Les variables visuelles.....	105
7.2.4	Graphique et perception	106
7.2.5	La couleur.....	107
7.3	Attributs thématiques et mise en classes	107
7.3.1	Carte en symboles proportionnels	110
7.3.2	Cartes en plages de couleurs.....	110
7.3.3	Nombre de classes et indice de Huntsberger	111
7.3.4	Détermination des limites de classes.....	112
7.4	Habillage et production de cartes thématiques	113
7.4.1	Habillage d'une carte.....	113
7.4.2	Esthétique	113
8	RÉFÉRENCES	114

Sources

Ce support de cours est basé sur deux sources. Premièrement le livre rédigé par Régis Caloz et Claude Collet en 2011 et publié aux Presses polytechniques et universitaires romandes (PPUR maintenant appelées « EPFL PRESS »)

Caloz, R., & Collet, C. (2011). Analyse spatiale de l'information géographique. PPUR Presses Polytechniques Universitaires Romandes, Lausanne

Il est complété par les MOOCs (Massive Online Open Course) « Systèmes d'Information Géographique - Partie 1 » et « Systèmes d'Information Géographique - Partie 2 » produits par Stéphane Joost, Marc Soutter, Amadou Sall et Fernand Kouamé, et à partir desquels deux BOOCs ont été rédigés :

Joost, S., Soutter, M., Sall, A., & Kouamé, F. (2017). Systèmes d'Information Géographique 1, EPFL Press, Lausanne ([BOOC SIG 1](#))

Joost, S., Soutter, M., Sall, A., & Kouamé, F. (2017). Systèmes d'Information Géographique 2, EPFL Press, Lausanne ([BOOC SIG 2](#))

Les MOOCs ont été publiés d'abord chez Coursera

[Lien sur SIG 1](#) — Coursera

[Lien sur SIG 2](#) — Coursera

Puis une version a été adaptée à l'EPFL sur Courseware

[Lien sur SIG 1](#) — Courseware

[Lien sur SIG 2](#) — Courseware

La modélisation spatiale

Toute représentation de la réalité géographique relève d'un processus de modélisation. La cartographie en a été la première étape formelle dans ce sens. Les *Sciences de l'information géographique* ont apporté une vision et une compréhension plus larges et plus profondes des processus de modélisation et d'exploitation des informations géographiques. Cette première partie examine les éléments principaux et les étapes servant de repère à la modélisation en base de données géographiques ainsi que les contraintes auxquelles il est nécessaire de se soumettre pour assurer la cohérence et l'intégrité de celles-ci.

1 La modélisation spatiale

1.1 De la réalité géographique à ses modèles

Si, aujourd'hui, l'analyse spatiale concerne en priorité les traitements numériques appliqués sur des informations contenues dans une base de données dans le but de créer de l'information sur une thématique du territoire, le processus d'analyse était déjà présent chez le géographe lorsqu'il élaborait une carte. Dans cette opération, il s'agit de dégager de l'ensemble des informations contenues dans une image ou dans le champ visuel de l'observateur les objets et les relations structurant le territoire. Simplifiant la réalité par un processus de généralisation, on crée un modèle de celui-ci. La *modélisation de l'espace géographique* constitue ainsi la première étape d'analyse spatiale. Objets, relations et autres variables de l'espace, telle l'altitude, sont organisés ensuite dans une base de données.

Cette première partie présente un résumé du processus de modélisation et des principales contraintes qu'il doit respecter. La phase de modélisation est primordiale dans la mesure où elle conditionne toutes les capacités d'analyse offertes par la base de données qu'elle produit.

Successivement, nous abordons le processus de modélisation, la constitution des unités spatiales et la nature de l'information spatiale dans la perspective des analyses statistiques.

Processus de modélisation

Une analyse, même superficielle, de l'image aérienne représentée sur la figure 1.1 révèle immédiatement la complexité d'un territoire, davantage encore s'il est marqué par la présence de l'homme comme c'est le cas ici. De plus, cette vision du monde réel est limitée à la perception visible des phénomènes et des objets de cette réalité. En effet, il est fréquent que l'on y trouve associées des maisons d'habitation, des zones cultivées, des portions de forêt ainsi que des infrastructures routières. Il n'est guère possible de procéder à un inventaire exhaustif de tous les objets présents et de percevoir toutes leurs relations. Devant cette difficulté, les scientifiques réduisent la complexité par la conception d'un *modèle* qui ne retient que les éléments jugés significatifs pour le phénomène étudié de manière à mieux comprendre son fonctionnement.



Fig. 1.1 Image aérienne d'une portion de territoire (Région de Morges – Vaud - ©Swisstopo).

Le processus cognitif mis en œuvre rejoint celui plus général de la connaissance scientifique et concerne un *objet*, une *méthode* et des *connaissances*. L'objet, dans notre cas, est une portion de l'espace géographique, l'approche est systémique pour tenir compte de sa complexité ; les connaissances se rapportent aux diverses disciplines ayant le territoire comme objet et à celles propres aux sciences de l'information géographique. Ces composantes font l'objet de développements dans les sections suivantes.

L'espace géographique

« L'espace géographique, concept le plus général, se définit comme l'étendue terrestre utilisée et aménagée par les sociétés en vue de leur reproduction au sens large, soit non seulement pour se nourrir et s'abriter, mais dans toute la complexité des actes sociaux. Il comprend l'ensemble des lieux et de leurs relations. Il est de ce fait à la fois un système de relations et un produit organisé résultant des interactions entre la nature et les sociétés. Il a des lois et des règles d'organisation et de différenciation universelles mais exprimées différemment selon les systèmes. Au premier rang d'entre elles se trouvent la gravitation et, plus généralement, tous les effets de la distance, de l'agrégation et de l'espacement. **On peut y reconnaître cinq usages fondamentaux : appropriation, exploitation (ou mise en valeur), habitation, échange (ou communication), gestion.** » [Brunet, 1992].

Le territoire

Le territoire, concept plus opérationnel, est considéré, dans le cadre d'une analyse spatiale centrée sur les activités humaines, comme une portion de l'Espace géographique circonscrite par des limites politico-administratives : une municipalité, un département, un canton, une région, un pays, etc.

1.2 Approche systémique

Les objets de l'espace géographique ne sont pas indépendants. Ils interagissent entre eux par la dynamique des phénomènes naturels et par l'action de l'homme. Ils forment donc un système. Lors du processus de modélisation, il s'agit ainsi de saisir la réalité par ses composants et par leurs interrelations. C'est l'*approche systémique*.

Un modèle est une réduction contrôlée de la réalité. Il est en général finalisé dans la mesure où il est conçu pour satisfaire des objectifs préalablement fixés. Un modèle du territoire dépend fortement du regard disciplinaire : géologue, hydrologue, aménagiste perçoivent et décrivent l'espace géographique de manière différente. Le choix de l'échelle de description est aussi fondamental.

Les SIG s'attachent à décrire une portion de l'espace géographique par l'inventaire des éléments stables et de leurs relations pour la compréhension de son fonctionnement. Le modèle produit est censé rendre cohérentes les diverses représentations de la réalité.

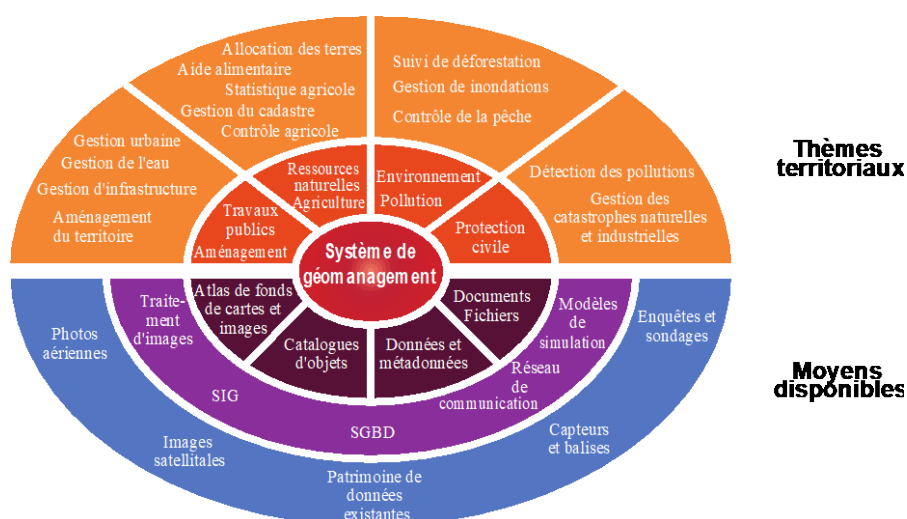


Fig. 1.2 Le système de géo-management d'après Cogels adapté du modèle de Walliser [1977].

Le processus de modélisation est lui-même complexe et dépend fortement de ceux qui l'utilisent. Les étapes principales à parcourir peuvent se résumer de la manière suivante :

- Appréhension globale de l'espace géographique par la sélection des éléments jugés importants.
- Identification des éléments significatifs en leur affectant un nom.

- Identification des relations existantes entre les éléments.
- Déterminations des propriétés des éléments et de leurs relations.

La figure 1.2 dresse un inventaire de domaines, de catégories, de secteurs d'activité intervenant dans la gestion d'un espace géographique. Il sort du propos de cet ouvrage de justifier et de développer les rôles dévolus à chacun de ces éléments. Cet exemple est là pour illustrer la complexité et la diversité des éléments du système.

1.3 Catégories de modèles

Un modèle décrit un système par son état et par son évolution prévisible. Selon le poids accordé à l'un ou à l'autre, le modèle est *descriptif* ou *prédictif*.

Le modèle *descriptif* est une sorte de photographie de la réalité. Celle-ci est décrite dans l'état où elle se présente à une période donnée. On suppose que les éléments retenus n'évoluent que très lentement. Lorsque la réalité aura évolué rendant son modèle caduc, on procédera à la mise à jour du premier modèle. Les bases de données géographiques (BDG) appartiennent à cette catégorie.

Un modèle *prédictif* s'attache à décrire l'évolution d'un phénomène de manière à pouvoir prédire un état futur à partir d'un état initial connu. Il s'applique généralement à des phénomènes à évolution rapide dans le temps et l'espace. Sa mise en œuvre repose sur une expression mathématique liant les variables significatives.

On connaît plusieurs types de modèles prédictifs :

Le modèle est dit *boîte noire* lorsque le comportement du système est décrit dans sa globalité uniquement par les relations entre variables d'entrée et celles de sortie. Par exemple, le comportement d'un bassin versant est décrit par la relation entre l'événement pluvieux et le débit observé à l'exutoire.

Le modèle est considéré à *base physique* si le comportement du phénomène est décrit par des lois physiques. Hormis les coefficients d'ajustement, les variables intervenant dans les équations possèdent une dimension.

Le modèle est *stochastique* s'il contient des éléments aléatoires.

Un modèle est qualifié d'*explicatif* dans le cas où la complexité du phénomène est telle qu'il devient impossible de simuler son évolution avec une incertitude acceptable. Néanmoins, les variables, introduites dans le modèle et déterminées par une analyse approfondie du phénomène, contribuent fortement à la compréhension de son comportement.

1.4 La modélisation cartographique

La cartographie a été, sans doute, la première manière de produire un modèle de l'espace géographique. Contenu et sémiologie graphique sont élaborés en fonction de l'objectif poursuivi. Celui-ci est fortement dépendant de la discipline; il détermine le contenu thématique, notamment la topographie, les réseaux routiers, les catégories d'occupation du sol, les unités de végétation, la géologie, etc.

Plus généralement, on résume les fonctions de la carte par :

- La reconnaissance d'un lieu.
- La représentation spatiale d'objets ou de classes d'objets.
- La représentation d'inventaires thématiques et leur distribution spatiale.
- La représentation de phénomènes dynamiques au moyen de signes (direction d'écoulement de nappe phréatique, de vents dominants, etc.)

La carte est un modèle de la réalité privilégiant la représentation géométrique des objets ou des catégories d'objets. La logique d'une carte est graphique et sémiologique. La précision de la représentation géométrique des objets dépend de l'échelle cartographique choisie. Toute l'information est sur la carte et dans l'habillage, particulièrement la légende qui l'accompagne.

Notons que la carte en elle-même est une base de données géographique dont toute l'information est exprimée par la représentation graphique et la légende qui l'accompagne. Les figures 1.3, 1.4 et 1.5 donnent un aperçu de la diversité des modèles cartographiques les plus courants en fonction du thème et de l'échelle.

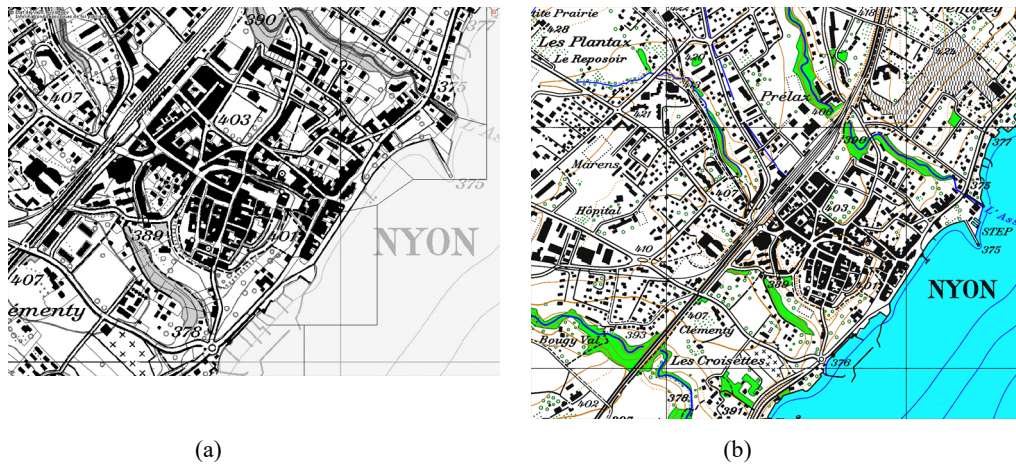


Fig. 1.3 Représentations cartographiques : (a) extrait du plan d'ensemble ; (b) extrait de la carte au 1 : 25'000 de la région de Nyon (©Swisstopo).

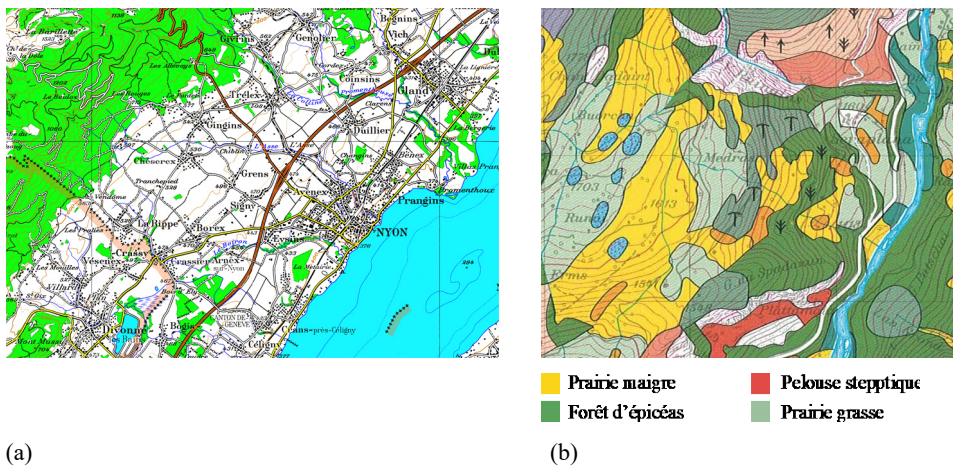


Fig. 1.4 Représentations cartographiques : (a) extrait de la carte nationale suisse au 1 : 100'000 - ©Swisstopo ; (b) extrait de carte de végétation au 1 : 50'000.

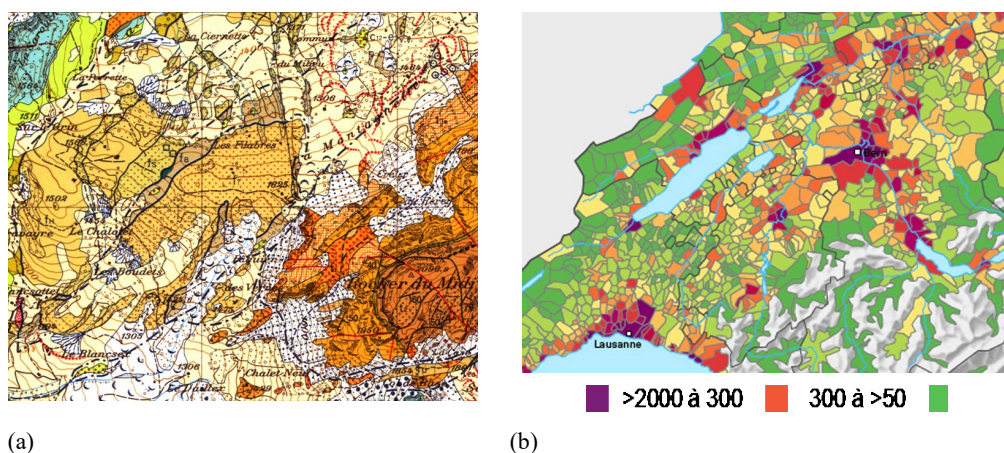


Fig. 1.5 Représentations cartographiques : (a) extrait de carte géologique – Mosses. (©Swissstopo); (b) carte de densité de la population suisse en 2000 (© Office fédéral de statistique).

1.5 Modèles d'appréhension de l'espace

De par sa définition, un SIG est un modèle d'information. Mais quelles sont les structures et quels sont les contenus possibles de ce modèle? Rappelons que l'espace géographique est perçu au travers des objets spatiaux, de la distribution spatiale des phénomènes, des processus et de leur dynamique tant spatiale que temporelle. La seule distribution spatiale nous conduit à identifier des phénomènes à distribution *discrete* tels un bâtiment, une forêt, un segment de cours d'eau (fig. 1.6b) et d'autres à distribution *continue*, par exemple l'altitude (fig. 1.6a). Ces deux types de distribution déterminent le mode de modélisation de l'espace géographique ainsi que les méthodes et opérateurs d'analyse.

Phénomènes discret et continu

Un phénomène spatial *discret* est circonscrit par ses limites. Il constitue de ce fait un objet géographique. La structure du système d'information qui lui correspond tend donc à reproduire cette perception. On l'appelle pour cette raison l'*approche objet*.

Un objet spatial est une portion délimitée de l'espace possédant une propriété thématique unique. Une fois ces objets définis, il est possible de les caractériser par des propriétés relatives à d'autres thèmes ; par exemple, caractériser une unité administrative prédéfinie par son contenu démographique (nombre d'habitants), géologique, végétal, etc.

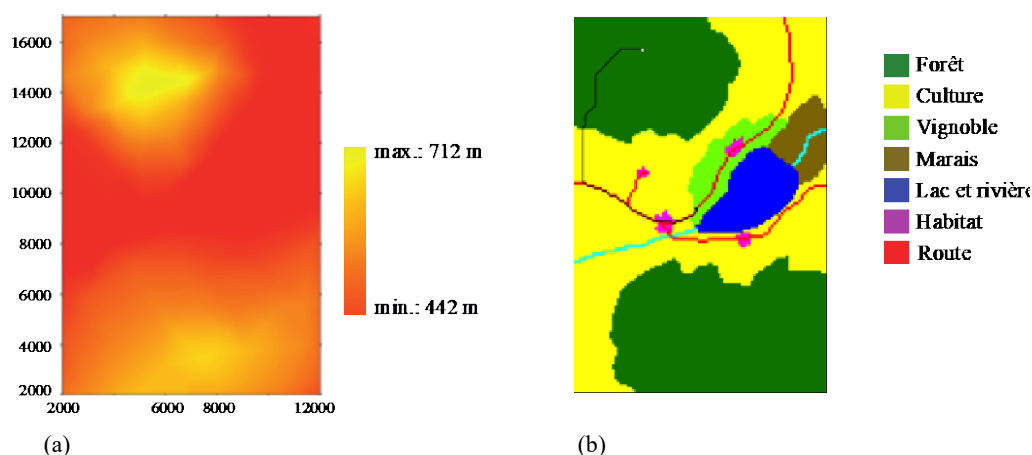


Fig. 1.6 Exemple de phénomènes spatialement continu et discret. (a) l'altitude (continu) ; (b) l'occupation du sol (discret).

En revanche, un phénomène spatial *continu* tel l'altitude, l'humidité ou la température de surface n'est pas identifiable comme un objet occupant une surface donnée sur le territoire. Il se représente soit par des isolignes, soit par la valeur mesurée en des endroits particuliers de manière à rendre compte des

variations de ses propriétés dans l'espace. Les isolignes offrent une bonne appréhension visuelle de la variation spatiale du phénomène, cependant l'information qu'elles fournissent est souvent fortement appauvrie par le pas des intervalles de valeurs choisis. Il paraît plus judicieux de représenter une variable continue de l'espace par les valeurs qu'elle prend selon la structure d'une grille régulière. On segmente l'espace en un nombre fini d'éléments et on assigne à chacun ses propriétés spécifiques.

Ce mode de discrétisation conserve davantage de nuances sur la variabilité spatiale et offre beaucoup d'avantages pour les traitements numériques. La structure de l'information en grille à mailles régulières est similaire à celle d'une image numérique produite par un radiomètre à balayage. Par analogie, cette manière de procéder est souvent dénommée *approche image* ou *raster* si l'on tolère l'anglicisme.

L'approche image ou raster n'est pas réservée aux seules variables continues. L'information associée à une maille peut représenter également son contenu thématique comme l'occupation ou l'utilisation du sol.

Dès lors que l'on a sélectionné les objets spatiaux ou choisi la taille des mailles, on s'attache à les observer pour déterminer leurs propriétés. Chaque portion de l'espace concernée devient ainsi une *unité d'observation*.

1.6 Concepts spatiaux fondamentaux

La carte a été le premier modèle de l'espace géographique. Son évolution en base de données géographiques n'a pas remis en cause les concepts fondamentaux sur lesquels reposent la modélisation et la représentation de l'espace géographique. Ils sont brièvement décrits dans cette section.

1.6.1 Échelle cartographique – Échelle d'observation

La cartographie a popularisé la notion d'échelle. Il n'est de carte digne de ce nom sans que l'échelle de la représentation graphique soit clairement indiquée! Du point de vue géométrique, l'échelle est le rapport entre la distance mesurée sur la carte et celle correspondant dans la réalité.

Cette notion d'échelle est identique dans les SIG lors d'une représentation graphique des éléments de l'espace géographique soit à l'écran, soit sur un support papier. Elle prend, cependant un sens plus général et plus complexe dans le processus de modélisation de la réalité. Quel objet sélectionner ? Sous quelle forme géométrique ? Ponctuelle, linéaire ou zonale ? Avec quel degré de sinuosité tracer les contours ? En d'autres termes, avec quel degré de généralisation ? Des questions similaires sont posées pour la richesse informative thématique.

En fait, l'échelle correspond au degré de résolution auquel un phénomène ou une portion du paysage est décrit. Elle est inhérente à toute observation. Dans une base de données spatiales, des éléments décrits avec des précisions différentes peuvent coexister. Par exemple, une borne d'hydrante est géoréférencée à la précision du plan cadastral (quelques centimètres) alors que les limites forestières le sont, le cas échéant, à une résolution spatiale de quelques mètres.

Dans le contexte des SIG, il est indispensable de distinguer la notion d'*échelle de modélisation* ou d'*observation* de celle, voisine mais différente, d'*échelle de représentation cartographique*.

Le choix de l'échelle de modélisation est guidé par la finalité de la modélisation. Il détermine la présence et la richesse des entités spatiales à décrire ainsi que l'information à saisir sur ces objets. Le choix de l'échelle de représentation cartographique est, quant à lui, dicté par des contraintes techniques graphiques et d'ordre physiologique (capacité perceptive de notre système visuel) et esthétique.

L'interdépendance de ces deux types d'échelle est particulièrement grande dans la pratique, car la carte est à la fois une source d'information sur les entités spatiales et le produit d'une exploitation des SIG. Rappelons, pour fixer les idées, qu'un centimètre sur une carte au 1 : 25'000 correspond à 250 m sur le terrain, à 1 km au 1 : 100'000, etc.

Comment évaluer une échelle de modélisation?

Une règle empirique consiste à repérer à quel moment un objet devient observable s'il est reproduit sur un document cartographique. Il est raisonnable d'affirmer qu'une surface sur la carte inférieure à 1x1 mm ne peut plus représenter un élément zonal. Cela revient à associer une échelle cartographique à la résolution spatiale. On admet qu'une résolution de 10 m par exemple correspond à une perception spatiale de l'ordre du 1:10'000. Cette règle produit un ordre de grandeur, il convient donc de l'exploiter avec circonspection. Cette règle n'est pas valable pour l'affichage ou l'impression d'image numérique, car un flou, désagréable d'un point de vue visuel, apparaît dès que le côté du pixel dépasse les 0,3 à 0,4 mm.

1.6.2 Géoréférencement : positionnement et projections

La localisation des objets dans un espace décrit à la fois leur position dans un endroit de cet espace et leurs relations par rapport aux autres objets. Elle inclut donc les deux notions de position et de voisinage. Dans la vie quotidienne, on utilise fréquemment la notion de voisinage pour localiser des objets; on dira par exemple que l'épicerie du village se situe près de l'église. Dans cet exemple, la localisation fait appel à la notion de voisinage, une mesure de proximité, en relation à un objet de référence dont la position est implicitement perçue. A l'évidence, une telle localisation ne convient pas à la description d'un ensemble d'objets complexes tels que ceux exploités dans le cadre des SIG. Les exigences sont bien plus élevées, comme elles l'étaient déjà pour la cartographie conventionnelle. On parle, dans ce cas, de positionnement des objets sur la surface terrestre. Comme dans le cas cité, il est nécessaire d'établir un *système de référence* et une *métrique* pour la mesure de l'éloignement. Le système le plus simple et le plus fréquemment utilisé est le système euclidien basé sur l'hypothèse d'un espace plan, continu et d'une métrique constante, défini par un système d'axes perpendiculaires entre eux. Les systèmes cartographiques reposent sur ce principe qui est également adopté pour les SIG.

Le problème fondamental de la localisation sur la surface de la Terre provient du fait que la surface du globe est courbe à cause du relief et de la quasi-rotundité de la Terre. Pour inscrire les informations sur une surface plane, on exploite les propriétés de la projection géométrique en sachant que la perte de la 3^{ème} dimension entraîne inévitablement une erreur sur le positionnement cartographique. Divers procédés de projection ont été élaborés. Leurs principes sont examinés au paragraphe suivant qui traite des systèmes de projection liés à la géoréférence.

1.6.3 Systèmes de projection

La géoréférence consiste à établir un système de référence pour positionner tout objet à la surface terrestre. Le système de référence est dit *universel* s'il est le même pour tout endroit de la planète, il est *relatif* s'il ne concerne qu'une région ou un pays [Howald, 1994].

La surface de la Terre est courbe, il est souhaitable, pour des raisons évidentes de commodité, de la représenter sur une surface plane. Pour l'obtenir, on a proposé des systèmes de projection de manière à établir une relation ponctuelle univoque entre la surface de la Terre et la représentation plane. Un système de projection se base sur quelques repères, résumés ici pour mémoire.

- La surface du globe est modélisée du point de vue géométrique par une *surface équipotentielle en gravité* appelée *géoïde* ajustée sur un niveau moyen de la surface de la mer. Par l'étude des variations de trajectoire observées sur les satellites, on a obtenu une connaissance très précise du géoïde.
- Cette surface est cependant trop complexe pour servir directement à la projection sur une surface plane, elle est, à son tour, approximée par un *ellipsoïde de révolution*. Celui-ci est ajusté soit *globalement* pour l'ensemble de la planète soit *localement* pour accorder davantage de précision à la cartographie nationale (fig. 1.7). Le premier cas a donné lieu au *système géodésique de référence* ou sous sa dénomination anglaise au « *World Geodetic System* ». Actuellement, la référence est le *WGS 84* valable pour toute la planète et pour tout levé de

coordonnées au GPS. Dans le deuxième cas, un pays adopte un ellipsoïde dont le centre ne coïncide pas avec celui de la Terre de manière à réduire les erreurs planimétriques de sa cartographie. De surcroît, il adopte un système de projection propre. L'ensemble constitue sa référence légale de positionnement.

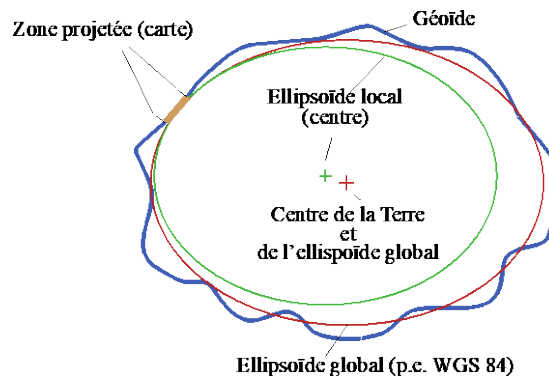


Fig. 1.7 Géoïde, ellipsoïde global et ellipsoïde local.

- En coordonnées sphériques, tout point sur la surface de la Terre s'exprime par trois paramètres : λ pour la longitude, φ pour la latitude et r pour la distance au centre de la Terre.

Les sciences géodésiques proposent trois catégories de projection. Chacune d'elles privilégie la conservation d'une propriété au détriment des autres. Ces propriétés sont l'*orientation* ou la *direction*, la *surface* et la *distance*.

Une projection est dite *conforme* lorsqu'elle respecte les directions relatives, c'est-à-dire l'angle formé entre deux directions. Elle est dite *équivalente* si elle conserve les aires des objets projetés. La troisième est appelée *équidistante* ; elle conserve les distances.

La cartographie topographique s'établit selon une *projection conforme*. Le mode de projection est choisi de sorte que, localement, les distances soient respectées dans un intervalle d'erreur tolérable.

Il existe de nombreuses projections. Les deux les plus courantes sont la cylindrique et la conique. Nous en présentons les éléments essentiels. Pour en savoir plus, nous invitons à consulter notamment « Cartographie mathématique », document publié par l'Université de Liège, Belgique [Donnay, 1997].

Généralement, les objets à la surface de l'ellipsoïde sont projetés, de manière orthogonale, d'abord sur une sphère de référence, puis de celle-ci projetés à nouveau sur une surface développable en un plan, le cylindre ou le cône. Les schémas présentés pour les différentes projections considèrent que la surface de référence est déjà une sphère. Plusieurs variantes de projections ont été proposées. Nous en exposons ici les principes les plus appliqués.

La *géoréférence nationale* est, dans la plupart des cas, exprimée en mètres selon une origine qui évite des ambiguïtés entre l'axe horizontal et vertical.

Projections cylindriques

Les figures 1.8(a) et 1.8(b) représentent deux possibilités de projection avec leur caractéristiques respectives.

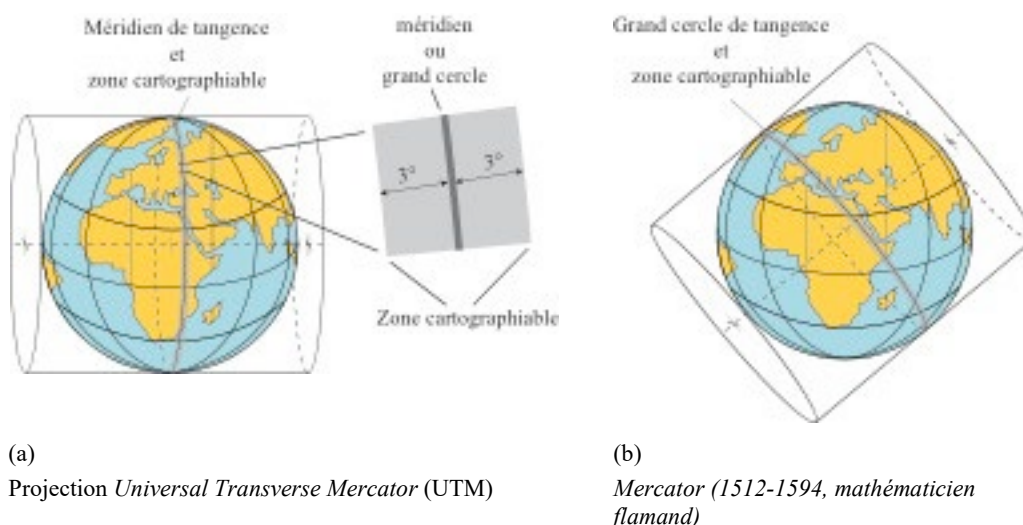


Fig. 1.8 Projection sur un cylindre : (a) tangent à un méridien ; (b) tangent à un grand cercle.

Pour la projection UTM, le cylindre est tangent à la sphère le long d'un méridien, donc pour chaque méridien un nouveau cylindre est défini. Pour que les déformations linéaires restent acceptables, on se limite à un « couloir » de $\pm 3^\circ$ de part et d'autre du méridien; il apparaît en grisé sur le graphique. La Terre est ainsi découpée en 60 fuseaux (fig. 1.9). Le méridien de Greenwich sépare les fuseaux 30 et 31 comptés en direction de l'est.

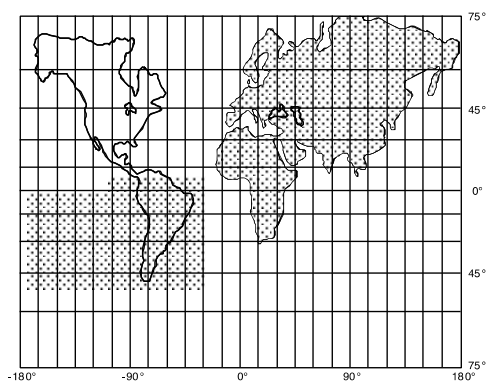


Fig. 1.9 Projection UTM schématisée.

Projection conique conforme de Lambert

Ce système de projection a été proposé par le mathématicien français, Jean Henri Lambert (1728-1777). Un cône est tangent à la sphère terrestre le long d'un parallèle (fig. 1.10). La France a adopté ce système pour sa cartographie topographique. Mais un seul parallèle de référence n'aurait pas suffi pour maintenir les déformations linéaires dans des limites acceptables. Aussi, 4 cônes de projection ont été nécessaires, 3 en métropole, 1 en Corse.

Le méridien origine, devenant l'axe des y, est celui de l'observatoire de Paris.

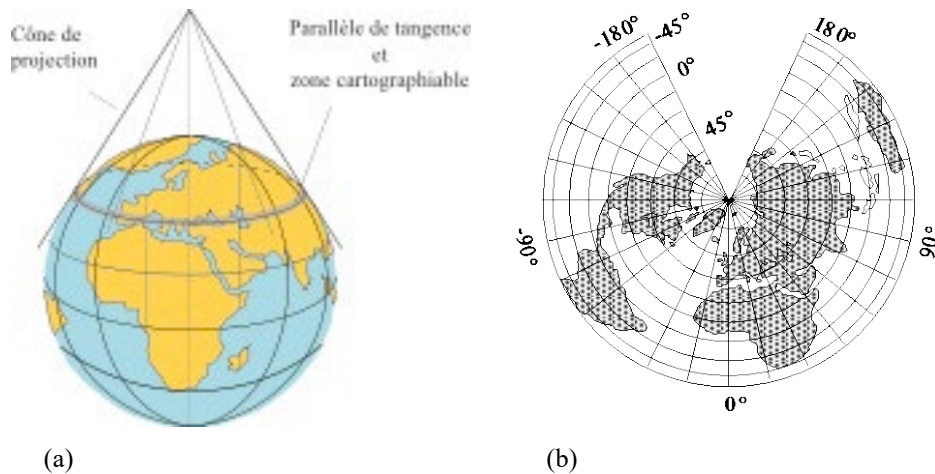


Fig. 1.10 (a) Projection conique ; (b) résultat de la projection.

Pour en savoir plus, nous renvoyons le lecteur aux ouvrages de *Topométrie opérationnelle* de M. Brabant [2003] et de *Topographie et topométrie moderne* [Milles et Lagofun, 1999].

1.6.4 Le positionnement

Le positionnement consiste à établir, au moyen de coordonnées, la position la plus exacte possible d'un point sur la surface de la Terre. Il est réalisé par les méthodes développées par la géodésie. Pour le positionnement géodésique, les précisions atteintes dépendent des moyens mis en œuvre. Elles peuvent être très élevées, de l'ordre du millimètre par rapport à une référence.

Les moyens conventionnels sont les levés topographiques et, actuellement, le positionnement par satellite tel le GPS (armée des États-Unis) ou AGNOS (Russie) ou encore Galileo (Europe).

1.6.5 Les relations spatiales

Travailler sur des entités spatiales implique la capacité de les localiser et de les décrire individuellement, ainsi que de les appréhender collectivement en décrivant leurs relations dans l'espace.

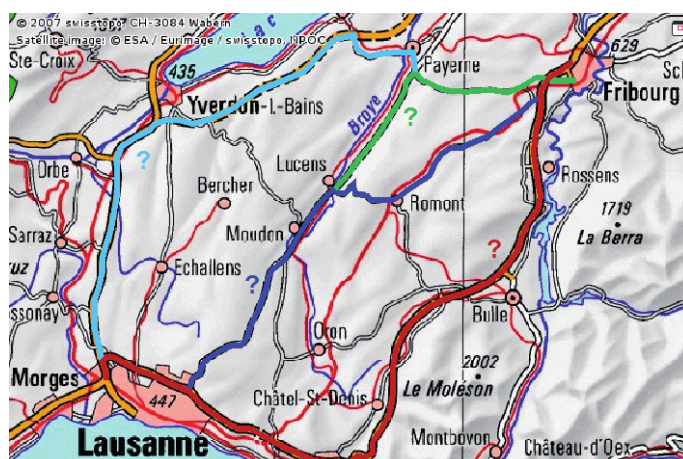


Fig. 1.11 Quel est le chemin le plus court en distance, en temps, en consommation d'énergie pour relier Lausanne à Fribourg? L'autoroute (tracé en rouge), l'alternative autoroutière (tracé en bleu et vert) ou la route conventionnelle (tracé en bleu foncé) (© Swisstopo).

Les relations spatiales recouvrent des situations fort différentes. Deux aéroports desservis par une ligne aérienne sont reliés indépendamment de leur éloignement. Dans ce cas, la proximité s'évalue en

heures de vol ou ... en une somme d'argent. Deux communes, situées dans deux vallées voisines et séparées par une chaîne de montagne, peuvent posséder une frontière commune et être éloignées en terme de distance qu'il faut parcourir pour aller de l'une à l'autre; la durée du trajet, dans ce cas, peut être supérieure à celle nécessaire pour relier deux aéroports fort éloignés. Un trajet est le plus fréquemment soumis à la contrainte de suivre le réseau routier. La portion de carte routière de la figure 1.11 illustre cette situation.

Les relations spatiales apparaissent également lorsque des questions courantes sont posées. La parcelle de M. Dupont jouxte-t-elle celle de M. Durant ? La rivière se jette-t-elle dans le lac, la villa de M. Dubonnet est-elle à proximité de la voie de chemin de fer ? Paris et Montréal ont-elles une liaison aérienne ? A quelle distance de Paris se situe Lausanne ? Quel est le parcours en voiture le plus court entre deux villes ? Etc.

D'autres situations dépendent de la relation entre les entités et le phénomène considéré. La relation n'est pas constante mais elle s'atténue en fonction de l'éloignement. Cette situation correspond bien à un phénomène qui possède une origine spatiale, telle une nuisance sonore, un panache de pollution, et qui se disperse progressivement dans l'espace géographique. Outre la modélisation du phénomène lui-même, la question pour les SIG est de définir la limite de la proximité ou du voisinage ou encore de déclarer des classes de voisinage. A partir de quelle distance une entité n'appartient plus au voisinage d'une autre ? La réponse dépend d'une décision de l'interprète et la notion même de voisinage est fonction du phénomène étudié. Le concept de la « logique floue » offre le moyen de produire empiriquement l'évolution du phénomène. La figure 1.12 représente trois fonctions d'atténuation (par exemple de bruit le long d'une route). La première crée une zone tampon sans nuancer la réduction progressive de la nuisance (fig 1.12(a)), la deuxième propose une atténuation linéaire (fig. 1.12(b)), la troisième une atténuation selon une fonction $f(d)$ non linéaire de la distance (fig. 1.12(c)).

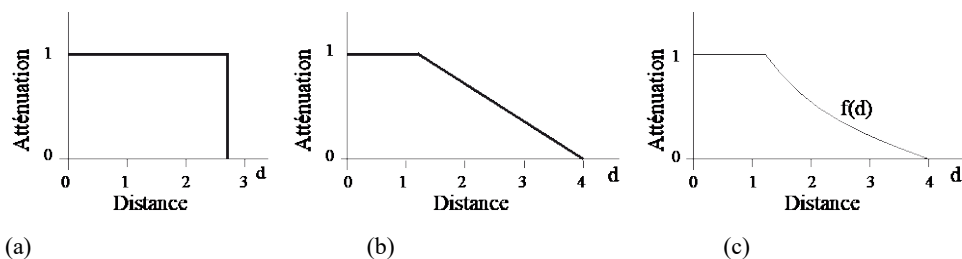


Fig. 1.12 Fonction d'atténuation modélisée en logique floue : (a) zone tampon ; (b) zone tampon puis atténuation linéaire en fonction de la distance ; (c) idem mais avec une atténuation non linéaire.

Une relation spatiale identifie toute propriété que partagent des unités spatiales entre elles; elle est indissociable de la notion de voisinage ou de liaison qui rend, selon une propriété donnée, deux entités dépendantes. Elle se manifeste donc par la géométrie lorsqu'il s'agit de voisinage ou par une liaison fonctionnelle exprimée par dans un attribut de la BDG.

Les notions de voisinage sont examinées et définies par les relations topologiques. Les liaisons fonctionnelles mettent en jeu le concept de distance qui lui-même dépend du modèle de la réalité spatiale. Celui-ci ne doit pas seulement contenir la description des entités et de leurs propriétés thématiques, mais aussi des éléments rendant compte de propriétés de l'espace par rapport à des processus de diffusion, de déplacement ou de potentiel d'attraction ou de rejet.

1.6.6 Notion de topologie

Les relations géométriques de proximité entre les entités sont décrites au niveau quantitatif par une métrique, la *distance* (comme on vient de le voir dans l'unité précédente), et, au niveau qualitatif, par la *topologie*. C'est le concept de topologie que nous abordons dans cette section.

Le concept de topologie, bien qu'il nous paraisse abstrait, se rapporte à une démarche courante de notre esprit pour appréhender la réalité. Notre perception visuelle est topologique dans la mesure où nous percevons un objet dans son contexte!

Les relations topologiques

Lorsque nous observons un paysage, un lieu, ou encore lorsque nous consultons une carte, un plan cadastral, notre perception immédiate est globale. Les objets tels que bâtiment, portion de forêt, agglomération sont « vus » dans leur contexte. La notion de voisinage est implicite: la rivière traverse l'agglomération, la parcelle de M. Dupont jouxte celle de M. Schmidt.

Selon notre appréhension de l'espace géographique, la topologie est donc l'ensemble des relations perçues qui nous permettent de situer les objets les uns par rapport aux autres. Le « voisinage » est donc une notion spatiale : « qu'est-ce qui est à côté de quoi? » Pour les réseaux, la question devient « qu'est-ce qui est connecté à? ».

La notion de topologie est un élément fondamental de l'analyse spatiale. Sans elle, il serait impossible d'extraire de la base de données des informations sur le voisinage d'une unité, sur les branchements d'un réseau hydrographique ou encore sur le sens d'écoulement de l'eau dans une rivière. La notion de topologie est également présente dans plusieurs disciplines.

Les mathématiques en donnent une définition rigoureuse : c'est la propriété des êtres géométriques subsistant après une déformation continue, et qui fait abstraction de la notion de distance. Elle est parfois appelée de manière raccourcie une *géométrie sans métrique*. En d'autres termes, la forme et la taille ne sont pas prises en compte dans la relation de voisinage (fig. 1.13). Pour les autres disciplines, le sens est plus large. En sciences humaines, la topologie signifie un arrangement, une configuration d'un groupe de notions et de leurs relations.

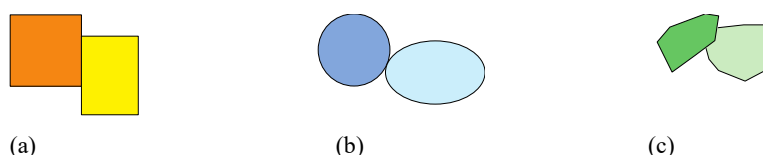


Fig. 1.13 Les situations a, b, c sont équivalentes du point de vue topologique.

Dans le cadre des SIG, on fait appel à la topologie pour rendre compte de façon sommaire mais synthétique de la proximité entre les entités. Les relations topologiques exploitées dans ce contexte sont l'*adjacence*, la *connectivité*, l'*inclusion* et l'*intersection*.

L'adjacence

La notion d'adjacence (ou contiguïté) implique que les unités spatiales possèdent en commun un *côté* ou un *sommet*. Une adjacence est dite au *sens strict* si seule une ligne frontière est commune, au *sens large* si au moins un sommet est commun comme l'illustre la figure 1.14. Elle répond à la question « Qu'est-ce qui est à côté de quoi? »

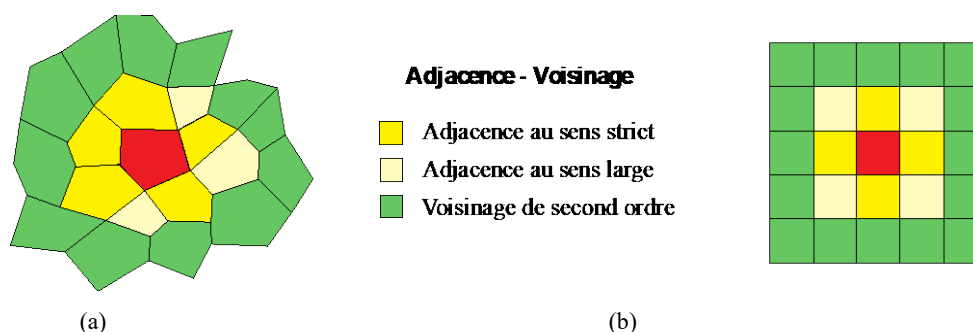


Fig. 1.14 Adjacences au sens strict et au sens large, du second ordre : (a) en mode objet ; (b) en mode image.

La topologie apporte cependant des nuances à la notion d'adjacence. Dépourvue de métrique, elle prend seulement en compte l'ordre dans lequel des unités spatiales se rencontrent en s'éloignant de l'unité cible. L'adjacence est dite de *1^{er} ordre* si les deux entités sont en contact, de *2^e ordre* si une entité s'intercale (fig. 1.14) et ainsi de suite. L'ordre d'adjacence intervient, par exemple, dans les transports

pour déterminer le nombre de transbordements nécessaires pour déplacer des biens ou des personnes d'un endroit à un autre.

L'inclusion

L'inclusion se rencontre lorsqu'une unité spatiale est totalement située à l'intérieur d'une autre, telle une enclave ou un îlot, les départements ou provinces à l'intérieur d'un pays. En termes topologiques, il s'agit d'un cas particulier d'adjacence.

L'intersection

L'intersection exprime le point ou la surface commune à deux entités.

Dans l'approche objet, la structuration de l'information et les relations topologiques sont déterminées lors de la constitution des entités; la topologie est qualifiée d'*explicite* ou, si elle est reconstituée lors de traitement, d'*implicite*.

Dans l'approche image, les propriétés topologiques sont implicites. L'adjacence est évaluée lors de l'exploitation dans le cadre d'analyse du voisinage et lors de la reconstitution des objets spatiaux à partir de la maille.

1.7 Unité d'observation

L'unité d'observation est le *support géométrique élémentaire* de l'information géographique ou la portion de l'espace géographique observée.

1.7.1 Définitions et propriétés

L'unité d'observation se définit comme *un élément constitutif de l'espace géographique observé et décrit par sa géométrie et par ses propriétés thématiques* (un bâtiment, un segment routier, une forêt, etc.).

D'un point de vue informationnel, elle ne peut se décomposer en sous-unités.

La détermination d'une unité d'observation est relative ; elle dépend de la focale ou de l'échelle à laquelle le phénomène est observé et de l'objectif poursuivi. Le géologue n'identifie pas les mêmes unités d'observation que le botaniste ou que l'aménagiste!

Une unité d'observation est *indivisible*. Une unité supérieure n'est pas la somme des unités qui la composent. Dans ce sens, une commune n'est pas la somme des bâtiments, des routes, des propriétés qui la composent. Si l'unité était décomposable, alors ce serait les unités « filles » qui deviendraient le support de nos informations. L'indivisibilité serait ainsi simplement reportée.

L'unité d'observation étant un élément du modèle de la réalité, son existence est totalement *définie par les propriétés* que nous avons choisies pour la décrire. Chaque propriété est considérée comme *homogène* sur l'ensemble de l'unité.

Une unité d'observation est dite *irrégulière* si ses contours épousent la forme ou la géométrie de l'objet spatial. Elle est *régulière* s'il s'agit d'une maille dans l'approche image. L'unité d'observation *irrégulière* est plus généralement dénommée objet spatial. Quant à l'unité d'observation *régulière*, elle est souvent désignée par les termes de maille, de cellule, voire de « pixel » par emprunt au vocabulaire de l'imagerie numérique.

L'existence d'une unité d'observation revêt une justification physique lorsqu'elle se réfère à un objet dont les limites sont clairement définies dans la réalité tel un bâtiment, une route. Un tel objet est défini *a priori* ou *prédéfini* en lien avec la thématique à traiter. Celle-ci se révèle dans les attributs qui le concernent. Les unités politico-administratives, un objet physique tel un bâtiment ou une maille en mode image se rattachent également à cette catégorie (fig. 1.19a).

Elle est dite *a posteriori* ou encore *résultante* lorsqu'elle est le produit d'une agrégation spatiale d'unités d'observation contiguës et possédant une même propriété thématique. En mode image, on désigne par le terme de *région* ces agrégats de mailles (fig. 1.19b).

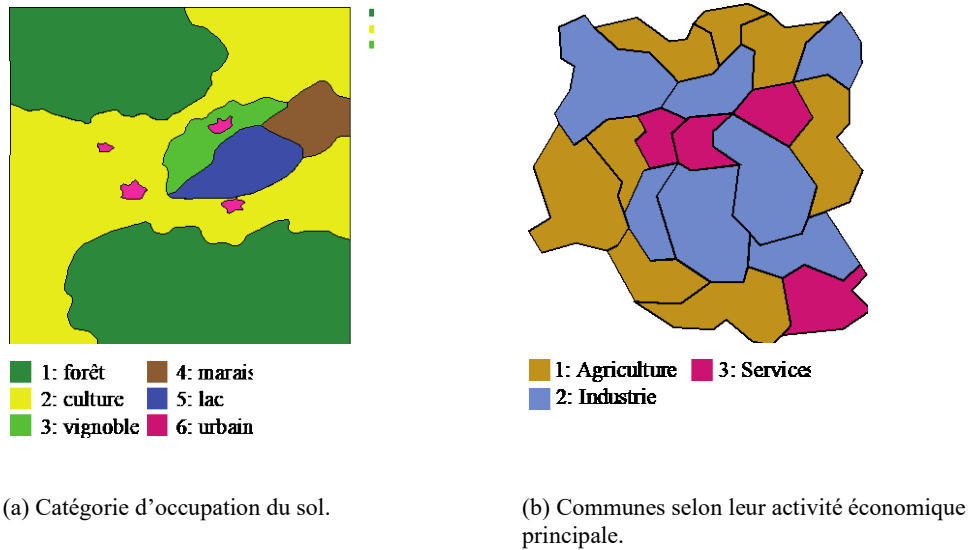


Fig. 1.15 Distribution spatiale discontinue : production d'objets résultants (a) et propriétés d'objets prédéfinis (b).

1.7.2 Unités spatiales irrégulière et régulière, leurs dimensions

Unité spatiale irrégulière

Lorsque l'objet spatial trouve une correspondance immédiate avec nos catégories mentales, il est naturel de modéliser d'abord sa *forme* par une *représentation géométrique* plus ou moins fidèle de la réalité selon le degré de généralisation appliqué. Les formes produites sont diverses. Les objets reflétant des constructions humaines coïncident souvent avec des formes géométriques relativement simples telles que des segments rectilignes, des polygones réguliers ou irréguliers. Au contraire, les unités identifiant la distribution spatiale d'un phénomène naturel prennent des formes quelconques.

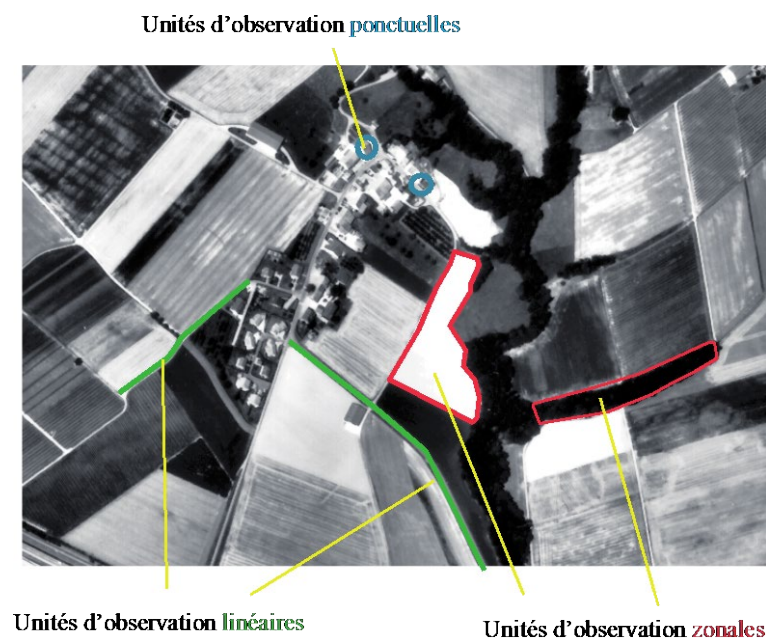


Fig. 1.16 Unités d'observation irrégulières ou objets spatiaux.

On distingue trois types d'unité spatiale irrégulière : *ponctuel*, *linéaire* et *zonal* (fig. 1.20).

L'affectation de l'unité d'observation à l'un ou l'autre type dépend de l'échelle à laquelle on souhaite le représenter ou, en d'autres termes, de l'importance accordée à sa dimension spatiale. Un même objet, considéré comme ponctuel à une échelle donnée, devient zonal à plus grande échelle ou, comme c'est le cas pour les unités de végétation, la diversité des unités et leur nombre diminuent avec l'échelle pour conserver une représentation visuellement interprétable.

Unité d'observation régulière

L'espace géographique est divisé en maille régulière par superposition d'une grille virtuelle. La taille de la maille dépend de l'échelle d'observation adoptée. Dans cette approche en mode image, les objets spatiaux ne prennent forme qu'au terme d'une analyse spatiale, ils sont donc résultants ou a posteriori, en fonction de la distribution spatiale des propriétés du thème traité. Pour les distinguer des objets spatiaux identifiés a priori en tant qu'unité d'observation, on les dénomme *régions*, de type *ponctuel*, *linéaire* ou *zonal*, selon la configuration produite (fig. 1.21).

Unité d'observation régulière (cellule)

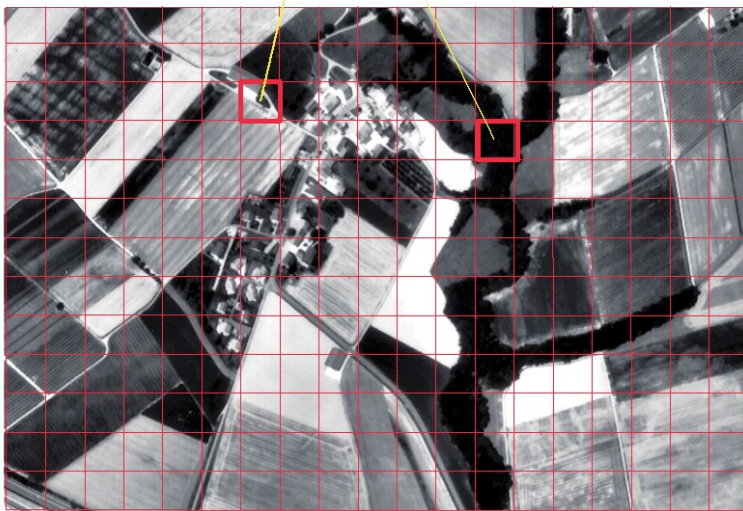


Fig. 1.17 Unités d'observation régulières, les mailles.

Pour chaque thématique, on affecte un attribut unique à chaque cellule. *Il y a donc autant de grilles appliquées que de thématiques à décrire.* Le cas de l'occupation du sol illustre cette situation dans laquelle plusieurs propriétés (catégories) d'intérêt peuvent être localisées dans une même maille: une route, des bâtiments, de la végétation, etc. Pour conserver l'information, il est indispensable de décomposer l'occupation du sol en plusieurs sous-thèmes tels que « voies de communication », « bâti », « hydrographie » et constituer une grille pour chacune d'elles.

L'espace géographique étant désagrégé ou discrétisé en entités irrégulières ou régulières, il s'agit maintenant de décrire leurs propriétés selon trois points de vue ou dimension : *géométrique*, *thématique* et *temporel*. Ces informations sont affectées soit à l'objet lui-même soit à la maille.

Dimension géométrique

La dimension géométrique recouvre les propriétés de *position* et de *voisinage* des entités spatiales, c'est-à-dire la localisation, la forme, la taille et la proximité.

En mode objet, l'unité est définie et localisée par les coordonnées des points de son modèle géométrique. Les autres informations sont pour la plupart extraites de celui-ci.

En mode image, les propriétés géométriques se réduisent à la *résolution* de la maille. La localisation est déduite du géoréférencement de la grille. Les propriétés de proximités sont examinées lors de l'exploitation de la base de données géographique.

Dimension thématique

La dimension thématique recouvre les informations pertinentes pour l'utilisateur caractérisant la nature, les propriétés (l'état) et les fonctions de l'entité.

En mode objet, la nature de l'objet apparaît souvent par son nom, par exemple « Bâtiment », « Unité de végétation ». Des attributs complètent cette première information. L'attribut « Type » rattaché au « bâtiment » permet de préciser s'il s'agit d'une construction en bois, en béton ou autre. Les propriétés reflètent la finalité ou les besoins du modélisateur : un pont sur une rivière est décrit par la largeur de la chaussée selon le Service des routes, par le débit maximal pouvant s'écouler au-dessous selon le Service des eaux. La fonction désigne le rôle que remplit l'objet dans le système constitué par l'espace géographique. Elle se traduit par des attributs tels que le débit attaché à un tronçon de rivière, le prix du m², le taux d'immission d'un polluant par unité de surface, l'émission d'une substance à potentiel polluant d'une cheminée d'usine, la valeur assurée d'un bâtiment, le rendement agricole d'une parcelle, l'altitude, l'occupation du sol, la couverture végétale, etc.

En mode image, *l'attribut est unique pour chaque maille*. Une catégorie de propriétés constitue la thématique d'une grille. On définit autant de grilles que l'on souhaite de thématiques descriptives de l'espace géographique.

Dimension temporelle

La logique d'un SIG repose sur le couple formé par l'unité géométrique et les attributs thématiques qui lui sont attachés. La dimension temporelle apparaît donc dans l'une ou l'autre de ces deux composantes. Elle se manifeste soit dans la modification de la géométrie de l'objet, soit par *l'évolution d'une ou de plusieurs de ses propriétés thématiques*.

Modification de la géométrie

L'unité d'observation irrégulière est définie par sa géométrie. Si cette dernière se modifie, on considère qu'il s'agit d'une nouvelle unité. La géométrie précédente est conservée si l'on souhaite établir un historique de l'évolution de l'objet représenté.

Pour les unités régulières, ce sont les attributs qui héritent en commun de la dimension temporelle.

Changement dans les propriétés thématiques

La dimension temporelle apparaît sous différentes formes, par exemple :

- La date de création ou de modification de l'entité.
- Un attribut décrivant une propriété temporelle de l'entité, tel un taux de croissance urbaine pour une ville, une durée moyenne d'un événement associé à l'entité, etc.
- Un changement de la valeur d'un attribut décrivant une propriété.

Dimension spatiale

Sur la base de ces trois dimensions fondamentales caractérisant le modèle de la réalité utilisé en analyse spatiale, il est encore nécessaire de considérer certaines de leurs combinaisons mises en œuvre dans le cadre de l'exploitation de l'information géographique.

La première de ces combinaisons est appelée *dimension spatiale*. Elle intègre les dimensions thématique et géométrique. On entend par *combinaison* la prise en compte simultanée des caractéristiques thématiques et géométriques des unités d'observation lors de l'analyse spatiale. Cette dimension s'applique autant au mode objet qu'au mode image. On trouve une illustration simple de cette notion dans la démarche d'interrogation : quelles sont les unités d'observation de catégorie

thématique « habitat » distantes de moins de 200 m de l'objet « tronçon d'autoroute » ? Il s'agit de ne retenir que les unités d'observation qui satisfont simultanément aux deux critères thématique et géométrique. Nous verrons aussi l'importance de cette notion lors de l'application des niveaux de modélisation de l'espace par une surface gauche isotrope ou anisotrope en analyse spatiale.

Dimension spatio-temporelle

Pour de nombreux objectifs de l'analyse spatiale, il est tout aussi important de traiter de la dynamique dans l'espace, tant en termes d'évolution des propriétés thématiques ou géométriques des objets qu'en ceux relatifs aux mouvements dans l'espace. Cette seconde combinaison regroupe simultanément les trois dimensions fondamentales définies : thématique, géométrique et temporelle. On la définit comme la *dimension spatio-temporelle*, appliquée dans les démarches les plus élaborées de l'analyse spatiale.

1.8 L'information spatiale et ses propriétés

L'information spatiale est aux SIG ce que l'atome est à la matière : l'*élément constitutif*.

C'est une information sur la réalité localisée dans l'espace ; elle exprime les propriétés géométriques par le géoréférencement et le voisinage ainsi que les propriétés thématiques ou temporelles associées. Elle caractérise, de ce fait, l'unité d'observation. On catégorise l'information spatiale selon *son échelle de mesure* (nominale, ordinale et cardinale) et selon *son origine* (mesurée, dérivée, interprétée).

1.8.1 Échelle de mesure de l'information spatiale

L'échelle de mesure est définie comme *l'ensemble fini dans lequel on qualifie ou quantifie des objets, selon des règles précises*.

Dans le cadre de la modélisation spatiale, l'échelle de mesure exprime la richesse du contenu informatif selon trois niveaux : *nominal*, *ordinal* et *cardinal*.

L'échelle *nominale* considère les propriétés permettant *d'identifier et de différencier* les unités d'observation et de les dénombrer. Cette échelle est présente avant tout dans la dimension thématique pour décrire des propriétés en termes de *catégories* : identifiant, nom, type, etc.

L'échelle *ordinale* inclut les aspects d'identification et de différenciation du niveau nominal précédent, mais de plus il ordonne les propriétés dans un sens hiérarchique : notation de qualité, relation de taille, etc. Cette échelle concerne principalement les propriétés thématiques des unités d'observation, mais on la retrouve aussi pour caractériser certains aspects de leur dimension géométrique (des propriétés topologiques par exemple) et aussi de leur dimension temporelle (pas de temps, périodes, etc.).

L'échelle *cardinale* ou d'*intervalle-rapport* concerne les variables continues exprimées en fonction d'une métrique définie : une distance, une température, etc. Il est important de réaliser que cette notion de continuité des propriétés thématiques est à différencier de la notion de *continuité de la distribution spatiale* ! En effet, une variable aux propriétés thématiques continues, telle que l'altitude, peut correspondre à une distribution spatiale discontinue, ou discrète, par le simple fait qu'elles sont affectées à des unités d'observations zonales telles que des objets administratifs, des polygones de Thiessen, etc. On observera ainsi des discontinuités spatiales dans la distribution du phénomène aux frontières de chacun des objets.

A chacun des niveaux de l'échelle de mesure correspondent des opérateurs mathématiques et statistiques. Ils sont présentés de manière synthétique sur le tableau 1.1. Cette distinction est d'autant plus importante que l'information est codée sous forme numérique et que son contenu informationnel n'est pas aussi explicite que dans une forme textuelle ou graphique !

Tableau 1.1 Contenu informationnel et opérations permises selon l'échelle de mesure.

	Nominal	Ordinal	Cardinal
Contenu des informations	Identification différenciation	Identification, différenciation, hiérarchisation	Identification, différenciation, hiérarchisation, signification de l'intervalle
Opérations autorisées	=, ≠ Quelques opérations logiques	<, >, =, ≠ Opérations logiques	<, >, =, ≠, +, -, x, ÷ Opérations logiques et arithmétiques
Statistiques associées	Mode, diversité	Médiane, inter- quantile	Moyenne, variance, écart type corrélation, etc.
	Valeurs discrètes		Valeurs discrètes et continues

1.8.2 L'information mesurée ou primaire, dérivée et interprétée

Une information *mesurée* ou *primaire* est acquise par un instrument ou par une observation visuelle.

Une information *dérivée* est issue d'un calcul par combinaison d'informations primaires comme le sont le débit d'une rivière, la pente et l'orientation déduites d'un modèle numérique d'altitude.

Une information est considérée comme *interprétée* dans le cas où elle n'est pas mesurée ou mesurable, mais estimée par un expert ; c'est le cas de la cartographie des sols, des informations géologiques, etc. L'expert y introduit un contenu issu de ses connaissances et de son expérience.

1.9 Métadonnées ou méta-information

Toute la philosophie de notre démarche de modélisation repose sur quelques principes clés : l'intégration des données du territoire, la vocation pluridisciplinaire des SIG, la capitalisation et la diffusion des informations. Elle repose sur une définition rigoureuse de chaque information de sorte que son sens soit compris de la même manière par tous les utilisateurs et que son champ d'application soit clairement délimité.

Le meilleur moyen proposé pour promouvoir ces principes est de documenter l'information collectée relative aux entités et à leurs attributs, au cours de la procédure de construction de la base de données géographiques. Chaque entité, chaque attribut et chaque couche d'information sont définis et caractérisés selon l'échelle de mesure et sa nature. Les figures 1.22, 1.23 et 1.24 résument sous forme de fiches quelques informations considérées comme les *métadonnées* ou les *méta-informations* d'entité et d'attribut. Notons que l'information commercialisée est aujourd'hui considérée comme un produit au même titre qu'un objet. Pour cette raison, la communauté internationale a édicté des normes de type ISO.

Fiche entité							
Nom	Type	Définition	Échelle	Source	Mode acquisition	Liste Attributs	Remarque
Parcelle	Objet	Parcelle du cadastre foncier	1:500	Cadastre	Levé topographique	Numéro, Propriétaire, Aire, etc.	

Fig.1.18 Métadonnée pour une entité

Pour l'attribut *Type*, par exemple, une liste déroulante propose le choix suivant : *spatial, non spatial, zone, ligne, point*.

Fiche attribut							
Nom	Entité	Définition	Type	Échelle mesure	Remarque
Aire	Parcelle	Valeur officielle de l'aire de la parcelle	numérique	m ²			

Fig. 1.19 Métadonnée pour un attribut.

Les listes déroulantes associées proposent, par exemple, selon les attributs :

- *Type* : entier, réel, alphanumérique, date.
- *Échelle de mesure* : nominale, ordinale, cardinale.
- *Nature* : mesurée, dérivée, interprétée.
- *Mode d'acquisition* : mesurée à l'aide d'un appareil, numérisée à partir de documents existants, calculée, autre.

Fiche image							
Nom	No	Date	Source	Format
Lausanne	132	4.5.2010	Image SA	.jpg			

Fig. 1.20 Métadonnée pour une image.

Conclusion

La *modélisation* de l'Espace Géographique (EG) constitue la première phase de l'analyse spatiale. Elle crée le modèle sur lequel toutes les opérations ultérieures se basent pour dériver des informations, pour comprendre le comportement des phénomènes spatiaux et établir des indicateurs synthétiques contribuant à des prises de décision plus objectives.

Cette modélisation de l'EG repose sur deux modes de partition géométrique, le mode objet et le mode image donnant lieu respectivement aux unités d'observation irrégulières et régulières. Bien que simple par rapport à la complexité du monde réel, cette modélisation est riche en possibilités d'analyse. Elle présente également l'avantage de fournir sur le plan méthodologique des procédures transparentes pour tout utilisateur.

Divers concepts issus en partie de la cartographie (positionnement, topologie, projection) sont appliqués pour organiser et structurer les informations avant de les insérer en base de données géographique, relationnelle ou non.

La métadonnée est le complément indispensable pour une exploitation des informations conforme à leur mode d'acquisition, à leur nature et à leur précision.

Modèles numériques d'altitude et variables dérivées

Le relief est le facteur *révélateur* et *explicatif* prépondérant des phénomènes survenus à la surface de la Terre. Il a fortement conditionné et orienté l'appropriation de l'espace géographique par les sociétés humaines. Selon ses propriétés, les règnes animal et végétal trouvent des conditions favorables à leur établissement et à leur développement. Il occupe, de ce fait, une place majeure en analyse spatiale et dans toute discipline dont l'objet concerne les activités humaines ou des phénomènes naturels.

La mesure primaire du relief est l'altitude sur mer. Un fichier numérique contenant les mesures d'altitude aux nœuds d'une grille régulière constitue un modèle numérique d'altitude ou de terrain (MNA ou MNT).

Cette partie présente un bref historique des modes d'acquisition de l'altitude, puis expose les algorithmes et leurs propriétés permettant de dériver les indicateurs descriptifs du relief.

2 Le relief – modèles numériques d'altitude et caractéristiques dérivées

2.1 Le relief, sa mesure et sa description

Le relief est, par définition, « la forme, les inégalités de la surface terrestre ». Il est issu des mouvements géologiques et climatologiques survenus durant l'histoire de la Terre. Le relief façonne le paysage et crée les conditions favorables ou défavorables aux activités humaines, à l'exploitation du sol ainsi qu'à l'habitat d'espèces animales ou végétales. La connaissance de ses propriétés est indispensable pour la plupart des disciplines s'occupant d'activités humaines ou de phénomènes naturels.

Il a d'abord été décrit de manière *qualitative* avec des adjectifs tels que *plat*, *vallonné*, *accidenté*, etc. L'évolution des connaissances géodésiques et des moyens de mesure a ouvert la voie à une approche *quantitative*. La notion de *relief* est devenue alors étroitement liée à la *mesure de l'altitude sur mer de chaque point de la surface terrestre*. De cette connaissance, on déduit de nombreuses variables qui caractérisent localement ou globalement un relief. Les variables « locales » les plus connues sont sans doute la *pente*, l'*orientation*, la *concavité* et la *convexité*. Des indicateurs comme la *rugosité*, l'*indice fractal* caractérisent une zone dans son ensemble. Quant à la *précision*, elle se réfère à la mesure de l'altitude en un point ou à un indicateur statistique.

L'altitude est une *variable continue* de l'espace géographique puisqu'il est théoriquement possible de déterminer sa valeur en tout point. Cependant, cette exhaustivité n'étant pas réalisable, on crée un modèle. Les altitudes sont acquises selon un *mode d'échantillonnage irrégulier* ou *régulier* pour créer, selon les termes consacrés depuis l'émergence du concept de SIG, un *modèle numérique d'altitude* (MNA) ou *de terrain* (MNT).

Les *propriétés* d'un MNA sont déterminées par le mode d'acquisition et, corollairement, par sa *résolution* et sa *précision*. La résolution correspond à la densité de l'échantillonnage ou, dans un modèle régulier, à la distance séparant deux points voisins. *Résolution* et *échelle d'observation* sont synonymes. A une forte densité de points (plusieurs points par m² pour un modèle produit par un laser à balayage) correspond donc une grande échelle cartographique. La précision concerne la *planimétrie*, c'est-à-dire le positionnement du point échantillonné, et l'*altimétrie*. Pour cette dernière, elle s'exprime généralement par un indicateur statistique tel que le RMS (*Root mean square*).

Pour un problème donné, le choix du modèle revêt une grande importance car la pertinence des résultats en dépend. On recherchera toujours l'adéquation entre l'échelle d'observation du phénomène et la résolution du modèle.

La terminologie utilisée pour le modèle d'altitude est discutée. On trouve le plus fréquemment l'expression *Modèle numérique de terrain* (MNT). A l'origine, le MNT désignait toute information numérisée de terrain telle que la granulométrie, l'occupation du sol et, bien entendu, l'altitude. Progressivement, il a désigné presque exclusivement l'altitude. Étymologiquement, il est plus juste d'inclure le mot altitude. En anglais, la même confusion est présente : *Digital Terrain Model* (DTM), *Digital Elevation Model* (DEM) [Ansault, 1988]. Bien que MNT soit plus fréquemment usité, nous optons, dans le présent chapitre, pour la dénomination MNA et son équivalent anglais DEM.

2.2 Les représentations du relief

Au XIX^e siècle, la géomorphologie, qui étudie la forme et l'évolution de la surface terrestre, s'intéressait en priorité à l'échelle paysagère. L'approche était essentiellement descriptive. Elle a atteint son plus haut niveau avec les travaux de William Morris Davis (1850-1934). L'analyse de la topographie se décomposait en quatre étapes : *Go, See, Think and Draw*. On étudiait la forme du paysage et les processus physiques qui l'avaient probablement produite. A l'image d'autres domaines scientifiques, les méthodes de la géomorphologie ont évolué considérablement au cours des décennies. Elles sont devenues de plus en plus *quantitatives* et recourent à diverses *méthodes statistiques* [Ansault, 1988]. La figure 2.1 illustre la variété de paysages produits par des reliefs différents.

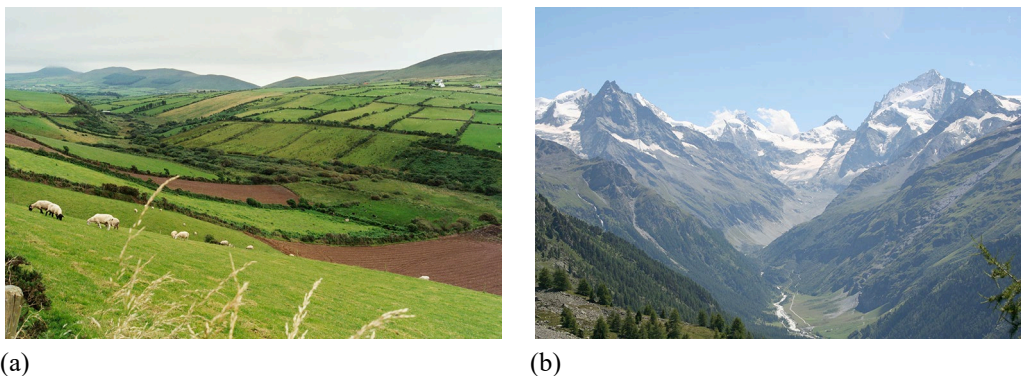


Fig. 2.1 Différentes formes de relief : (a) Vallonné (Irlande) ; (b) montagneux, accidenté (Val d'Anniviers (Suisse) (Photos R. Caloz).

La cartographie a, dès ses débuts, accordé de l'importance à la *représentation* du relief. C'est évidemment une information indispensable pour situer des objets dans leur contexte ou pour évaluer la difficulté d'un déplacement. Faute de pouvoir mesurer l'altitude en tout point, on se contentait pour les premières cartes de représenter le relief par des hachures (fig. 2.2(a)). Plus tard, on a introduit les courbes de niveau et l'ombrage pour suggérer le relief (fig. 2.2(b)).

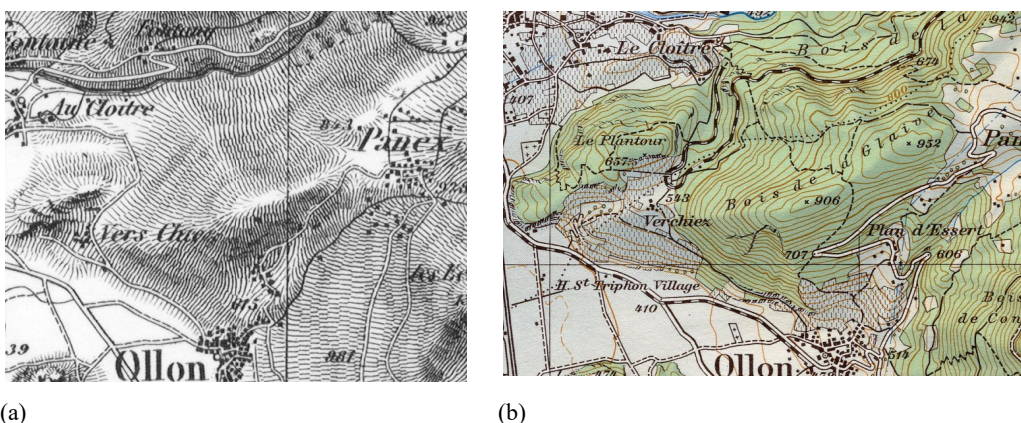


Fig. 2.2 Représentations cartographique du relief : (a) par hachure - carte Dufour (1855) ; (b) par courbes de niveau et ombrage – carte topographique actuelle CN25 (© Swisstopo).

Remarque : origine de l'ombrage

Dans l'hémisphère nord, lors du lever du soleil, les ombrages se produisent vers l'ouest, puis, progressivement vers l'est en passant par le nord. Aux environs de 10h du matin GMT, l'ombrage est au nord ouest. Or, sur les cartes topographiques, comme l'illustre la figure 5.2(b), l'ombrage est orienté à l'opposé, c'est-à-dire vers le sud-est. Cette opposition provient du fait que les cartographes sont généralement, comme le reste de l'humanité, droitiers et que l'éclairage de leur planche à dessin se plaçait naturellement en haut à gauche de leur poste de travail, c'est-à-dire au nord-ouest de la carte.

2.3 Les modèles numériques d'altitude

Un levé d'altitude par semis de points régulier ou irrégulier donne lieu à un *modèle numérique d'altitude* (MNA).

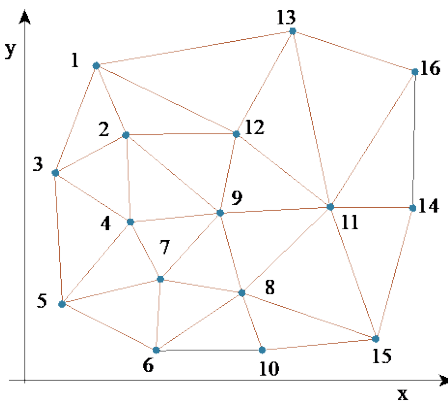
Courbes de niveau

Le premier modèle d'altitude est celui bien connu des courbes de niveau. Celles-ci offrent, pour un lecteur de carte avisé, une représentation suggestive du relief. Sous forme numérique, ce sont des objets linéaires dont l'attribut est l'altitude. Ce modèle est, cependant, peu satisfaisant car tout calcul

de variables dérivées, telle la pente, est fastidieux et exige des transformations qui le rendent similaire aux deux modèles présentés ci-dessous.

Semis irrégulier de points ou TIN (*Triangulated irregular network*)

Un semis irrégulier de points apparaît lorsque l'altitude est mesurée ponctuellement soit de manière aléatoire, soit en suivant les lignes de structure du relief ou des points particuliers. Le cas le plus fréquent est celui d'un levé à grande échelle cartographique pour l'implantation d'une route ou d'un ouvrage. Il s'agit pour l'ingénieur d'estimer notamment les volumes de terre à déplacer. L'altitude est donc une valeur *mesurée*. La précision dépend de la procédure et des appareils utilisés. La figure 2.3 présente un extrait d'un semis de points irrégulier avec le tableau de valeurs correspondant. Ce modèle de description s'apparente à celui de la modélisation par « facettes triangulaires », fréquemment utilisée dans le domaine de l'ingénierie pour décrire les objets dans leur volume.



(a)

ID	Altitude [m]	x	y
1	1515	8056,4	7604,0
2	1558	8074,9	7561,5
3	1599	8030,8	7537,9
4	1605	8077,2	7508,0
5	1663	8035,5	7458,4
6	1664	8093,0	7429,3
7	1624	8095,7	7473,0
8	1618	8145,7	7464,7
9	1578	8132,3	7513,5
...
16	1558	8252,3	7600,1

(b)

Fig. 2.3 Modèle numérique d'altitude sous forme : (a) d'un semis de points irrégulier (TIN) ; (b) d'un tableau de coordonnées.

Grille régulière

Dans ce modèle, les points altitude sont disposés selon une structure régulière de manière à former une grille. La résolution devient le côté de la maille. Les coordonnées de chaque point localisent, soit les nœuds de la grille, soit le plus fréquemment, le centre de la maille. Les logiciels de SIG font la distinction entre une matrice d'une image codée généralement en 8 bits (qui n'autoriserait que 256 niveaux de valeurs) et celle d'une MNA codée en valeurs décimales (« nombre réel »).

La figure 2.4 illustre diverses représentations graphiques d'un MNA.

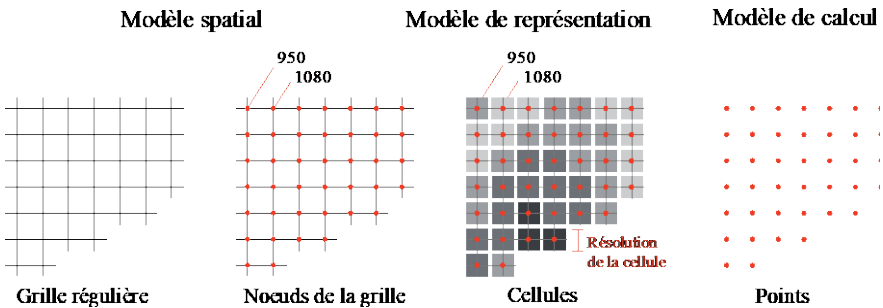


Fig. 2.4 Modèle numérique d'altitude sous forme d'une grille régulière.

Il est exceptionnel qu'un tel modèle soit formé de points *mesurés*. Généralement, il est produit par interpolation d'un semis de points irrégulier de sorte que la précision dépend du mode d'acquisition et de la procédure d'interpolation.

2.4 Modes d'acquisition de l'altitude

L'altitude est exprimée, dans le langage courant, en référence au *niveau de la mer*. Mais quel est le niveau de la mer pris en compte? Que signifie cette référence pour des endroits situés à plusieurs centaines de kilomètres de la côte la plus proche?

2.4.1 Niveau de référence de l'altitude

Dans sa définition actuelle, *l'altitude est la distance verticale séparant un point du relief à la surface du géoïde terrestre*. Le géoïde est lui-même défini comme la surface *équipotentielle en gravité* ajustée sur un niveau moyen de la surface de la mer comme défini à la section 2.6.

L'altitude, dite usuelle, en Suisse est celle déterminée par le nivellement de 1902 NF02. Une nouvelle référence a été établie au cours des années 1990 tenant compte de l'amélioration du géoïde et des avancées technologiques de mesures géodésiques dénommée RAN95 pour *Réseau altimétrique national de 1995*. Le système de projection est du type cylindrique oblique. Chaque pays procède de manière similaire.

Les précisions en planimétrie et élévation actuelles sont le fruit d'une évolution qui a franchi plusieurs étapes profitant des développements technologiques. Nous présentons ici, par ordre chronologique et dans leur principe, les méthodes exploitées pour l'établissement de carte ou pour les levés topographiques.

2.4.2 Levé topographique par triangulation

La planchette du géographe ou goniographe

Les premiers levés cartographiques prenaient une référence locale, c'est-à-dire un site particulier à partir duquel les distances et les élévations sont mesurées. Le principe repose sur la mesure de côtés et d'angles d'un triangle. Celui-ci est déterminé si, notamment, on connaît un côté et deux angles.

La *planchette* ou *goniographe* a été l'un des premiers instruments utilisés par les géographes pour la cartographie topographique.

Le dispositif consistait en une planchette de bois sur laquelle était monté un dispositif pour mesurer un *azimut* et *l'inclinaison* de la planchette avec l'horizontale.

La figure 2.5 illustre le principe de la mesure par triangulation.

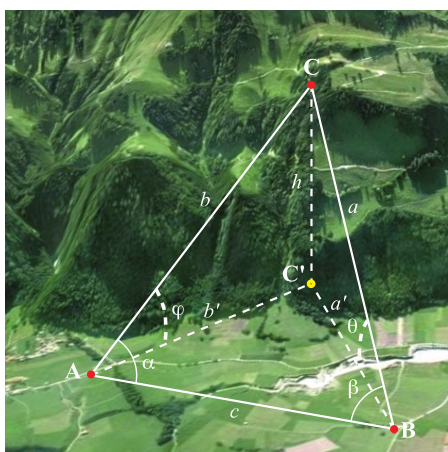


Fig. 2.5 Principe de la mesure par triangulation (image Google Earth). Le point C est « visé » à partir des deux sites A et B. L'un des deux sert de référence. La distance c est mesurée sur le terrain au moyen d'une chaîne d'arpenteur. Les angles α , β , θ et φ sont mesurés sur le goniographe. On dispose ainsi des informations pour localiser le point C et sa projection orthogonale C' .

Levé par théodolite

Le principe de la mesure basée sur les propriétés du triangle a été conservé pour les levés topographiques actuels utilisant un théodolite. Les mesures angulaires sont de très haute précision comme le sont également les distances obtenues par télémétrie laser.

Les mesures par *GPS différentiel* tendent, à l'heure actuelle, à remplacer les levés par triangulation.

2.4.3 La photogrammétrie

Développée dès que l'on a disposé d'images aériennes durant la 2^e partie du XIX^e siècle, la *photogrammétrie* n'a cessé de se perfectionner au cours du XX^e. Elle a été pratiquement l'unique moyen exploité pour la réalisation de cartes topographiques et, par le fait que celles-ci contiennent les courbes de niveau, l'*altimétrie*.

D'un point de vue géométrique, la photogrammétrie est similaire au système visuel humain qui perçoit les objets sous deux angles différents. Une seule image étant formée dans notre cerveau, les différences de relation entre les objets se traduisent en une perception de la profondeur.

A la place de nos deux rétines, la photogrammétrie dispose de deux images planes d'un même lieu mais prises sous deux angles différents. Les deux images forment le *couple stéréoscopique* duquel, grâce à des repères identifiables au sol, on calcule l'*altimétrie* et la *planimétrie*, c'est-à-dire le positionnement de tout objet au sol dans les trois dimensions x,y,z . Sur les mêmes relations géométriques entre clichés et réalité, on crée également une *orthoimage*, c'est-à-dire une image sur laquelle les distances horizontales sont respectées comme sur une carte topographique. La figure 2.6 illustre l'usage d'un couple de photographies couvrant partiellement la même zone géographique.

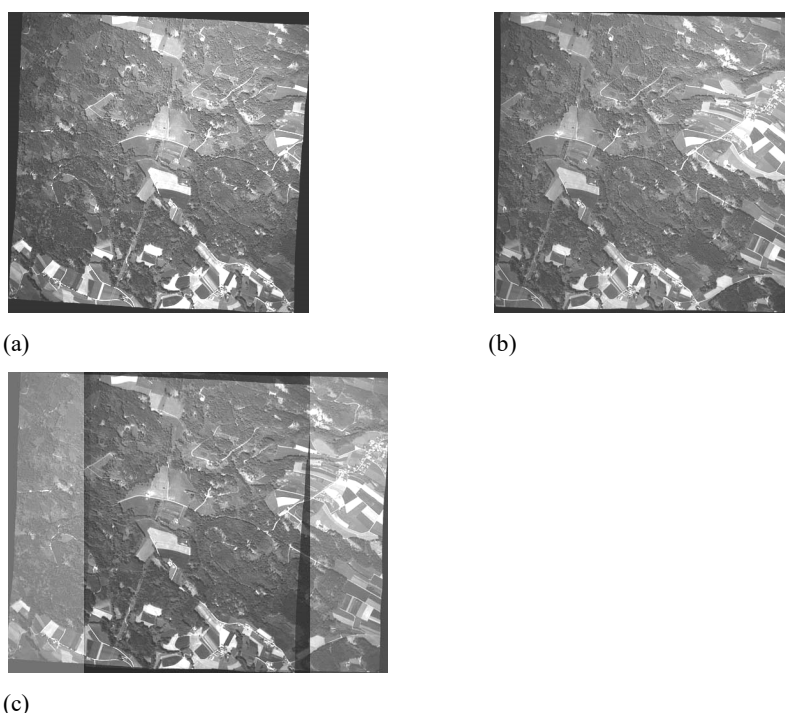


Fig. 2.6 Couple stéréoscopique et leur zone de recouvrement : (a) cliché 1 ; (b) cliché 2 ; (c) zone de recouvrement des clichés 1 et 2 (Jorat 6593, 6594 ©Swisstopo).

Le principe est d'exploiter la *parallaxe*, c'est-à-dire le déplacement apparent sur les clichés d'un objet vu sous deux angles différents. La figure 2.7 schématise la relation entre la parallaxe d' , mesurée sur le cliché, et la distance d séparant deux objets O_1 et O_2 dans l'espace réel (pour simplifier, les deux objets sont perçus sur la même ligne de visée pour la figure 2.6(a)). Connaissant la position relative

des clichés, on en déduit les relations angulaires. f_1 et f_2 sont, respectivement, les foyers des deux chambres photographiques. Les points (O_1 , O_2) et (O'_1 , O'_2) dans l'espace des images, sont dits *homologues* des objets O_1 et O_2 . L'identification de la paire de points homologues est dénommée *appariement stéréoscopique*. Connaissant les relations angulaires des triangles dont le sommet est f_2 et la distance d' sur le cliché 5.6(b), on déduit la distance d .

Pour une restitution photogrammétrique d'une zone territoriale, on dispose au sol de repères géoréférencés sous forme de *plaques réfléchissantes* de manière à les rendre facilement identifiables sur les clichés. Ce procédé est dénommé *aérottriangulation*. Ce repérage est nécessaire car la géométrie de la restitution des trois dimensions exige de connaître parfaitement la position relative des clichés lors de la prise de vue.

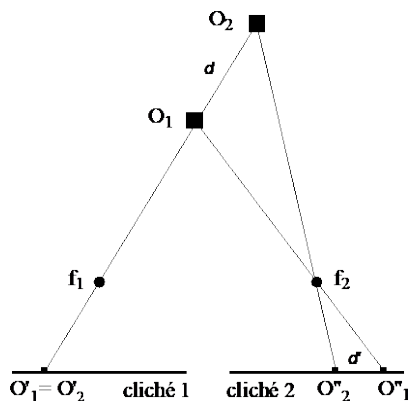


Fig. 2.7 Principe d'un couple stéréoscopique.

La photogrammétrique du relief ou de tout autre objet tridimensionnel est une science complexe du point de vue de géométrie. Elle a exigé la conception et la construction d'un instrument, le *restituteur photogrammétrique*, de haute précision. Jusqu'à l'avènement de l'informatique, le restituteur était dit *analogique* par le fait qu'il n'était basé que sur des relations mécaniques et optiques. Leur construction a été interrompue à fin des années 1980. La puissance des ordinateurs a permis, dès la fin de la décennie précédente, la mise au point de restituteurs dits *analytiques*. Une part importante des traitements est réalisée par ordinateur. La dernière étape a été franchie par le « tout numérique ». Toutes les fonctions de restitution sont intégrées dans un logiciel. Les points homologues sur les clichés numériques sont obtenus par corrélation.

Depuis le début des années 2000, l'altimétrie dite « par balayage laser » ou lasergrammétrie, moins coûteuse que la photogrammétrique, la supplante progressivement.

2.4.4 Radargrammétrie

Dans son principe, la *radargrammétrie* est similaire à la photogrammétrique; elle est également basée sur l'existence d'un couple stéréoscopique et de l'appariement stéréoscopique par l'identification de paires de points homologues. La nature des images radars produites par des *radiomètres à ouverture synthétique* (ROS ou en sigle anglais SAR) est cependant très différente, de sorte que la procédure de restitution altimétrique et les équations associées sont propres à ce système. Pour deux trajectoires de même altitude, ce qui est généralement le cas pour un radar embarqué sur un satellite, le paramètre principal est le rapport B/H où B est l'écartement entre les deux trajectoires et H la hauteur sur sol. Le radar imageur est un système dit actif. Le relief est « éclairé » par une impulsion d'un rayonnement électromagnétique du domaine des hyperfréquences de fréquences comprises entre 5 et 20 GHz et d'une durée de l'ordre de quelques dizaines de microsecondes (37,5 μ s pour le radar ERS1). L'éclairage étant latéral, les zones situées dans l'ombre projetée ne renvoient aucun signal. Pour une restitution altimétrique complète, il est donc nécessaire de disposer souvent de plusieurs images. D'autres artefacts dus à la nature très particulière des images radars surviennent également et exigent

des corrections. Pour en savoir plus, le lecteur est invité à consulter des ouvrages spécialisés notamment celui cité plus haut.

La radargrammétrie est exploitée par des radars aéroportés ou montés sur des plateformes spatiales.

L'action la plus connue est celle confiée à la navette *Endeavour* en février 2000, la mission SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*). Deux radars de type SAR ont été embarqués. Lors de la prise de données, l'un était sur la navette, l'autre au bout d'un bras long de 50 m de manière à réaliser tout au long de la trajectoire un couple stéréoscopique. .

Deux modèles sont mis *gratuitement* à disposition du public. Le premier est dénommé *SRTM30* car sa résolution est de 30 secondes d'arc, soit environ 900 m à l'équateur (figure 2.8).



Fig. 2.8 Extrait du SRTM30 (région de Suisse occidentale, 180x180km).

Le deuxième, *SRTM3*, est caractérisé par une résolution de trois secondes d'arc, soit environ 90 m à l'équateur.

Le troisième, *SRTM1*, plus précis, d'une résolution d'une seconde d'arc, soit 30 m à l'équateur, est payant et disponible aux Etats-Unis et dans certaines parties du monde pour lesquelles il a été calculé. La figure 2.9 permet de comparer visuellement pour un même relief l'effet de la résolution à droite (90 m) et à gauche (30 m).

Depuis 2009, on dispose d'une couverture mondiale gratuite d'un MNT dénommé GDEM (*Global Digital Elevation Model*) de résolution 30 m. Il a été réalisé en exploitant les couples d'images stéréoscopiques acquises par le satellite ASTER dépendant de la NASA et du ministère japonais de l'économie, du commerce et de l'industrie.

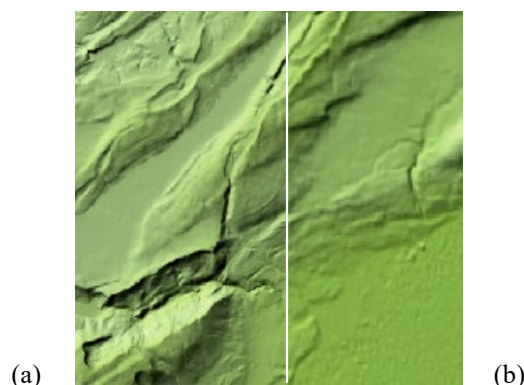


Fig. 2.9 Extraits du SRTM 30 m (a) et 90 m (b) (région de Neuchâtel 18x18 km).

2.4.5 Altimétrie par « laser à balayage » (LIDAR)

L'acquisition de l'altimétrie par « laser à balayage » est une technique de mesure de la position d'un point de la surface du territoire dans les trois dimensions (x,y,z). Le système électronique mesure le temps d'aller-retour et l'intensité d'un faisceau laser émis de la plateforme - généralement aéroportée. La connaissance de la position précise de la plateforme et la mesure des temps d'aller - retour des impulsions laser permettent de calculer la position des points ou, plutôt, des éléments de surface qui ont réfléchi le signal.

L'altitude sur sol de l'avion et son attitude sont repérées avec une très haute précision par un système de GPS différentiel (fig. 2.10).



Fig. 2.10 Principe de l'acquisition de l'altimétrie par balayage laser (© Swisstopo).

Plusieurs *échos* du signal émis peuvent être mesurés selon la nature de la couverture du sol. En couverture forestière, une 1^{re} réflexion est produite par les parties hautes de l'arbre. Si la fermeture végétale n'est pas complète, une partie du signal atteint des couches plus basses, voire le sol, et est à son tour réfléchi. Certains radiomètres enregistrent jusqu'à quatre échos pour un même rayon (fig. 2.11).

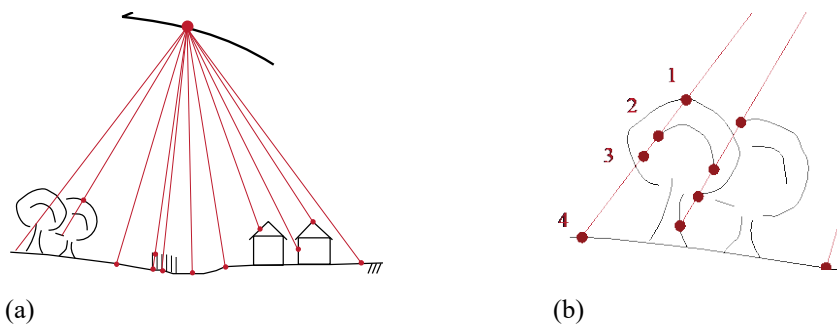


Fig. 2.11 Schéma d'une réflexion à plusieurs échos : (a) profil d'un balayage laser ; (b) échos multiples possibles en couverture végétale.

La longueur d'onde du faisceau est généralement comprise entre 0,8 et 1 μm , c'est-à-dire dans le proche infrarouge, l'intensité du signal de retour est porteuse d'informations sur les propriétés du couvert surtout végétal car celui-ci réfléchit bien ces longueurs d'onde.

L'enveloppe supérieure des réflexions prend la dénomination de *modèle numérique de surface* (MNS), alors que l'enveloppe inférieure, qui correspond en grande majorité aux échos provenant du sol, conserve le nom de MNT ou MNA. Ces deux modèles sont illustrés par un profil des échos laser (fig. 2.12) et par leur état de surface (fig. 2.14).



Fig. 2.12 Profil vertical d'échos laser. MNS : enveloppe supérieure ; MNT ou MNA : enveloppe inférieure.

Dans le but d'obtenir une acquisition rapide et une couverture maximale du territoire, le faisceau laser est le plus souvent orienté par un miroir rotatif, mais d'autres dispositifs existent. Cette technique permet de garantir un balayage de part et d'autre de la ligne de vol et de couvrir une tranche de sol appelée la *fauchée*. L'homogénéité de la distribution des points sur le territoire est garantie par un recouvrement partiel des lignes de vol et par des lignes de vols perpendiculaires entre elles. La densité de points au sol est fonction de l'altitude de vol adoptée et de la technologie laser utilisée. On observe souvent *plusieurs mesures* par m².

L'acquisition sur de vastes zones est réalisée par des équipements aéroportés. L'altitude de vol est d'environ 1000 m sur sol et la *fauchée* de l'ordre de 600 m. La *précision* altitudinale dépend de divers paramètres, notamment de la rugosité du sol. Pour le premier levé réalisé sur une grande partie du territoire suisse, Swisstopo déclare un RMS de 50 cm. La précision relative est certainement meilleure du fait de la forte autocorrélation spatiale qui caractérise ces mesures. A titre de référence, la figure 2.13 présente un profil d'altitude mesurée par laser à balayage sur la surface d'un aéroport. Les écarts correspondent au bruit de la mesure; ils sont de l'ordre de ± 7 cm.

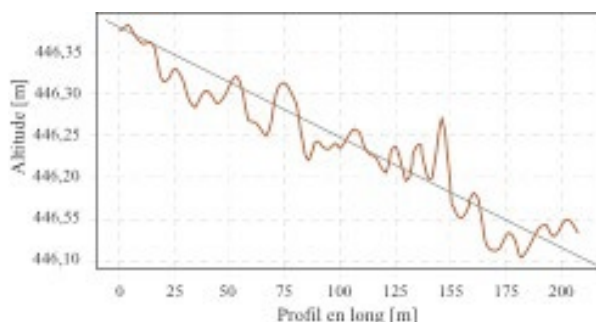
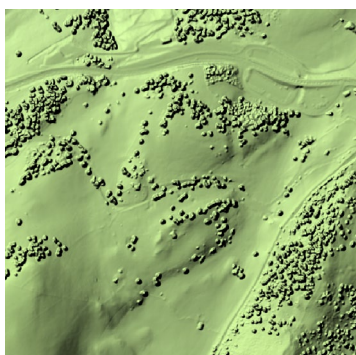
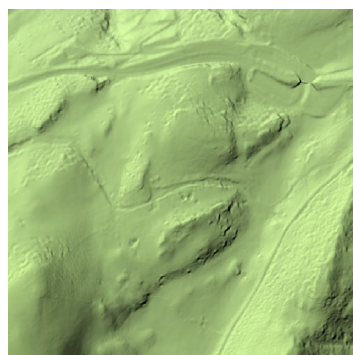


Fig. 2.13 Précision observée sur une surface plane, aéroport.

L'altimétrie par balayage laser a bouleversé les connaissances habituelles concernant le relief. Résolution et précision ont ouvert la voie à la détermination de phénomènes inaccessibles auparavant comme l'illustrent les quelques applications présentées en fin de chapitre.



(a) Modèle numérique de surface (MNS).



(b) Modèle numérique d'altitude (MNA).

Fig. 2.14 Portion de MNT (Région de la Vue des Alpes, Neuchâtel, 800x800m) : (a) modèle numérique de surface (MNS) ; (b) modèle numérique d'altitude (MNA).

2.5 Quelques sources de MNA

Selon les régions du monde, nous disposons aujourd'hui de plusieurs sources de modèle d'altitude. Les modèles à basse résolution couvrent la planète entière. A l'exception du SRTM1 et du DEM, les modèles à haute résolution (<30 m) sont produits au niveau national. Leur disponibilité dépend des législations propres à chaque pays. Ils sont présentés par ordre croissant selon deux classes de résolution : basse et haute.

Les premiers modèles numériques d'altitude couvrant le territoire ont été extraits des cartes topographiques par numérisation des courbes de niveau. Le procédé a été similaire dans tous les pays disposant d'une cartographie au 1:25 000 (ou à une échelle supérieure) de bonne qualité. Comme exemple, nous décrivons les différentes étapes et les choix adoptés par le Service de topographie fédéral de la Suisse.

2.5.1 MNA à basse résolution

Pour la Suisse, on dispose, depuis le début des années 1960, d'un modèle de 250 m de résolution.

A la fin de décembre 1960, par un projet dénommé RIMINI, l'Office fédéral de topographie (OFT) a créé un premier MNA relativement grossier constitué par une grille de points distants de 250 m. L'altitude a été obtenue par interpolation visuelle à partir des courbes de niveau de la carte au 1:25 000. Le principe est illustré sur la figure 2.15.



Fig. 2.15 Numérisation par estimation visuelle – Mode de création du modèle RIMINI à maille de 250 m. L'altitude 825 m est *estimée* par l'opérateur en référence aux courbes de niveau 820 et 830 (extrait de la carte 1223, © Swisstopo).

Le MNA-RIMINI a été constamment amélioré au cours des années. Cependant, sa résolution est trop faible pour les exigences actuelles en matière d'aménagement (fig. 2.16).

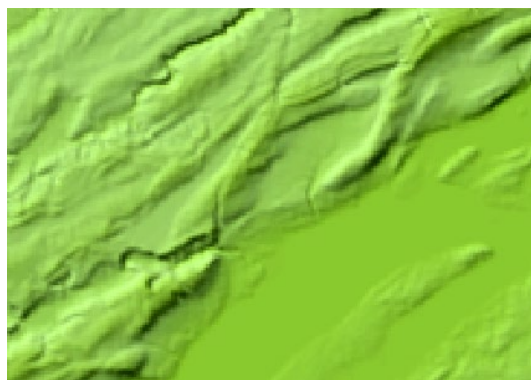


Fig. 2.16 Extrait du modèle RIMINI de résolution 250 m (région de Neuchâtel 46x43 km. © Swisstopo).

2.5.2 MNA à haute résolution

En raison de l'importance qu'ont revêtu les modèles numériques dérivés des cartes topographiques du 1: 25 000, nous leur accordons une description détaillée. L'exemple est celui produit par le Service fédéral de topographie (actuellement Swisstopo). A quelques variantes près, les autres pays disposant d'une cartographie au 1: 25 000 ont procédé selon les mêmes principes.

Les besoins de disposer de modèles numériques d'altitude sont apparus au début des années 80 avec la naissance des SIG. Tout naturellement, on a eu recours aux courbes de niveau de la carte topographique. Rappelons que les équidistances sont généralement de 10 m avec quelques ajouts à 5 m pour des terrains relativement plats.

Le MNA 25 de Swisstopo – une numérisation semi-automatique

La résolution adoptée est de 25 m (fig. 2.18).

La procédure de numérisation est semi-automatique, c'est-à-dire qu'elle requiert l'intervention manuelle de l'opérateur pour remédier aux situations que le logiciel ne peut traiter. Elle suit les étapes suivantes :

- Les planches graphiques (brune et bleue pour les cartes topographiques suisses) contenant les courbes de niveau sont scannées à une résolution de 50 μ (20 points/mm). Puis, par des procédés propres aux traitements d'images, les pixels parasites, les pixels superflus et les textes sont éliminés et les parties manquantes des courbes de niveau sont comblées.
- Les régions linéaires sont ensuite transformées en objets linéaires par « vectorisation ». Chacun reçoit, en attribut, l'altitude qui lui correspond.
- Une grille virtuelle de maille de 25 m est appliquée sur les courbes niveaux numérisées. L'estimation des altitudes aux nœuds de la grille est obtenue par interpolation. La méthode adoptée est de type non linéaire. Les interpolations se font en direction des lignes (est-ouest) et des colonnes (nord-sud) par interpolation *quadratique* pour les nœuds en bordure et *cubique* pour les autres. Les résultats de ces deux directions d'interpolation sont combinés avec une pondération inversement proportionnelle à la distance. La figure 2.17 illustre la procédure.

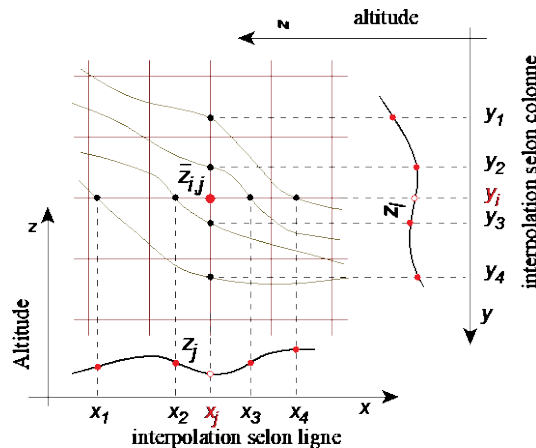


Fig. 2.17 Schéma de la méthode d'interpolation de type polynomial pour la création du MNA25.

La fonction d'interpolation est cubique, c'est-à-dire de la forme

$$\begin{aligned} z_{colonne} &= a_1 y^3 + a_2 y^2 + a_3 y + a_4 \\ z_{ligne} &= b_1 x^3 + b_2 x^2 + b_3 x + b_4 \end{aligned} \quad (2.1)$$

Quatre points sont nécessaires pour déterminer les coefficients a, b, c, d.

Pour chaque nœud de la grille et pour chaque direction ligne et colonne, on prend deux points d'intersection de part et d'autre. L'altitude affectée au nœud est la moyenne arithmétique des 2 valeurs calculées sur la ligne et la colonne. Pour améliorer la précision des estimations, on prend en compte d'autres points dont on connaît avec précision l'altitude.

Un modèle d'altitude issu de la numérisation de courbes de niveau est de bonne qualité. Il présente néanmoins divers inconvénients dont les deux principaux sont:

- Pour les zones plates, lorsque les points d'appui sont issus de la même courbe de niveau, les résultats d'interpolation présentent parfois une *ondulation de la surface*.
- Des *minima locaux artificiels* apparaissent assez fréquemment perturbant certaines applications en hydrologie, en particulier lors d'un calcul automatique d'un talweg ou d'un bassin versant.

La précision d'un MNA de ce type est généralement exprimée en RMS calculé sur une zone géographique correspondant à la carte topographique de laquelle on a extrait les courbes de niveau. Elle varie de l'ordre du 1,50 m en zones plates et à quelque 10 m en relief montagneux.

Notons que le RMS est un indicateur de précision relativement grossier dans la mesure où il ne tient pas compte de l'autocorrélation spatiale.

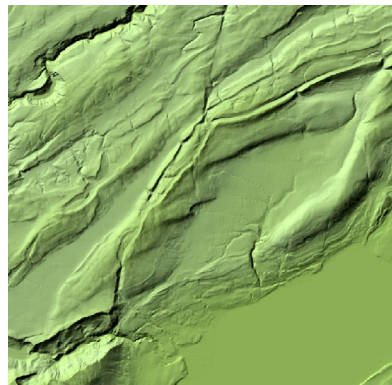


Fig. 2.18 Portion du MNA 25 d'une résolution de 25 m (région de Neuchâtel). A comparer avec le MNA de la figure 2.16.

2.6 Transformations et représentation d'un MNA

Selon les besoins, un MNA est susceptible d'être transformé. Deux cas sont évoqués ici : la création de *classes d'altitude* et le changement de *résolution*.

2.6.1 Création de classes d'altitude

Dans de nombreux problèmes d'aménagement, la connaissance précise de l'altitude en chaque lieu n'est ni nécessaire, ni utile. On procède alors à un classement ou recodage qui réduit la diversité des valeurs. Dans notre cas, le MNA est converti en classes d'altitude. L'opération logique est du type (*si ... alors ...*).

Par exemple, si z exprime l'altitude et C_i la classe d'altitude i , nous avons

si $z < 500$ ou $z = 500$ alors $C_i = 1$

si $500 < z < 600$ ou $z = 600$ alors $C_i = 2$

si $z > 600$ alors $C_i = 3$

La figure 2.19 illustre cette transformation.

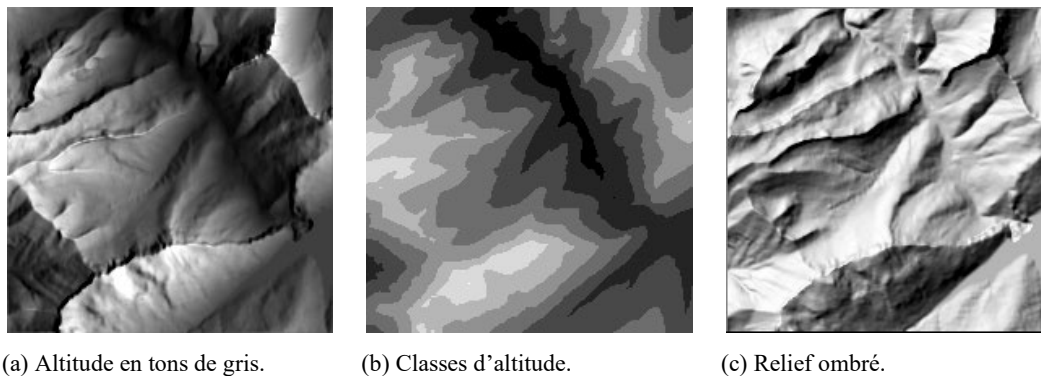


Fig. 2.19 Transformation d'un MNA en classes d'altitudes (Région Pays-d'en-haut, Suisse MNA25, (© Swisstopo).

2.6.2 Changement de résolution

Le changement de résolution est une opération aisée du point de vue du calcul. Elle est, en revanche, très délicate sous l'optique de la signification de *l'échelle résultante*.

Deux cas de figure se présentent : la résolution est soit augmentée par interpolation, soit, au contraire, dégradée.

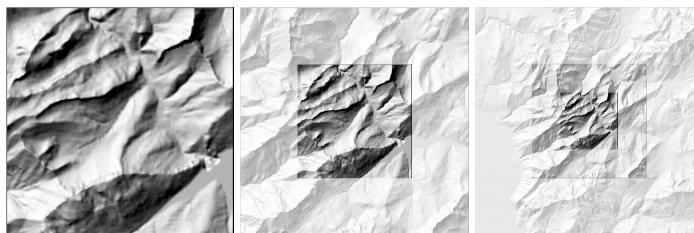
Dans le premier cas, seule la *représentation* est modifiée *sans qu'aucune information additionnelle* ne soit apportée. La modification d'échelle de perception n'est qu'apparente.

La deuxième situation mérite davantage de réflexion. La notion de résolution lors de l'acquisition est fortement liée à l'échelle d'observation, dans notre cas, du relief. Un modèle numérique d'altitude acquis précisément pour échelle du 1 : 100 000 aura une résolution plus faible que celui acquis pour un 1:25 000. Lors de l'acquisition, l'analyste fait correspondre son modèle du relief en optant pour une résolution adaptée à son échelle de perception compatible avec la représentation des éléments géomorphologiques qu'il souhaite mettre en évidence. Une transformation à une échelle inférieure est opérée de différentes manières, notamment par la suppression d'un point sur deux, par lissage à l'aide d'un filtre moyen, par une interpolation quadratique, etc. En fait, l'opération n'est que mathématique, elle ne fait pas intervenir une généralisation du relief adaptée à une échelle de perception de phénomènes géomorphologiques. En d'autres termes, la question est de savoir si la réduction de résolution correspond à une généralisation qui conserve les informations perçues normalement à la nouvelle échelle? Les résultats dépendent de la nature du MNA initial et du mode de dégradation adopté. Le concept d'ondelettes dont le principe a été proposé par D. Gabor vers 1940 et dont les bases mathématiques ont été établies en 1983 par J. Morlet a connu des développements extraordinaires en traitement d'image. Un filtrage par ondelettes est de type adaptatif : une zone de relief à faible ondulation n'est guère modifiée, au contraire, une zone accidentée subit un lissage proportionnel à sa rugosité. Elle agit donc de manière similaire à la démarche de l'analyste qui, selon son échelle de perception, élimine les détails tout en conservant les caractéristiques dominantes du terrain propre à chaque échelle d'observation.

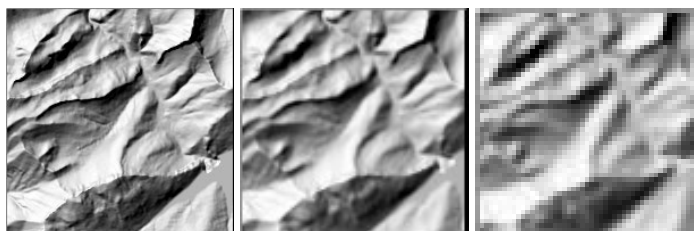
Les systèmes laser à balayage fournissent des modèles à très haute résolution (< 1 m). Disposant ainsi d'informations les plus détaillées du relief, il devient possible d'établir des modèles de résolution inférieure conformes à l'échelle d'observation de l'analyste.

Pour illustrer ce propos, la figure 2.20 reproduit un MNA 25 dégradé, à chaque étape d'un facteur 2. La première série d'illustrations réduit la taille de l'image dans la même proportion, la seconde conserve la même taille de manière à mettre en évidence les résolutions correspondantes.

Echelle de *représentation* respectant la résolution. Pour rester interprétable, l'espace géographique est agrandi dans les mêmes proportions



Mise en évidence de l'échelle d'*observation*



Résolution

25 m

50 m

100 m

Fig. 2.20 Résolution – Échelle de représentation – Échelle d'observation (© Swisstopo).

2.7 Géomorphométrie : approche globale

La *géomorphométrie* s'attache à déterminer des variables caractérisant les formes du relief.

L'approche est dite *globale* lorsque la zone d'étude est considérée comme un ensemble pour lequel on souhaite définir une ou des caractéristiques au moyen d'un indicateur calculé sur une base statistique. Grâce aux indicateurs globaux, il est possible de comparer rapidement le relief de plusieurs régions ou de bassins versants.

Selon le domaine théorique auquel ils se réfèrent, ces indicateurs sont qualifiés de *simples* ou *complexes*. Moyenne, minimum, maximum, variance, définis en statistique descriptive, sont considérés comme simples. En revanche, les indices de rugosité et l'indice fractal appartiennent à la catégorie complexe. La figure 2.21 fournit une statistique sur les altitudes de la zone présentée sur la figure 2.20.

Altitude minimale	: 952 m
Altitude maximale	: 2022 m
Moyenne	: 1470
Médiane	: 1453 m
Écart type	: 220,7 m

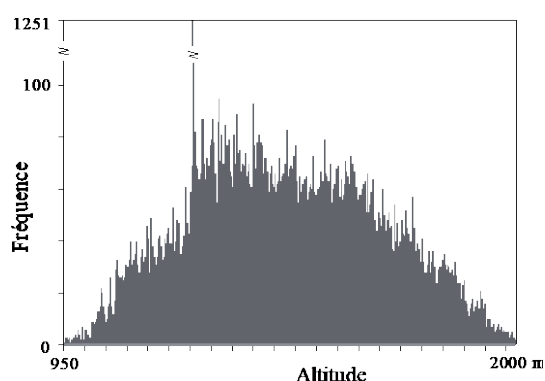


Fig. 2.21 Indicateurs de statistique descriptive, résumant les propriétés du MNA de la figure 5.20.

2.7.1 Indicateurs globaux

La courbe hypsométrique

La courbe hypsométrique exprime la répartition de la surface d'un bassin versant en fonction de l'altitude (fig. 2.22).

L'hydrologue interprète cette courbe pour estimer le comportement hydrologique et hydraulique du bassin et de son système de drainage.

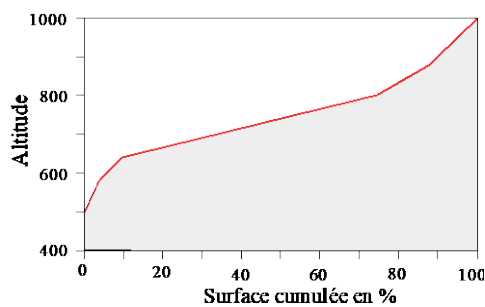


Fig. 2.22 Courbe hypsométrique (Bassin versant de la Mentue, Vaud, Suisse).

La rugosité

La rugosité exprime en général le *caractère irrégulier d'une surface*. Plusieurs paramètres sont nécessaires pour la décrire. Des modèles en comptent 5, d'autres 9. D'autres approches de la rugosité ont été proposées. Elles ne sont pas présentées ici, car dans la pratique de SIG, elles ne paraissent pas occuper une place prioritaire.

A titre d'illustration, nous mentionnons l'approche à trois paramètres (fig. 2.23). On calcule :

- les classes d'altitude moyenne,
- les classes de pente moyenne,
- les classes de distance entre les aspérités.

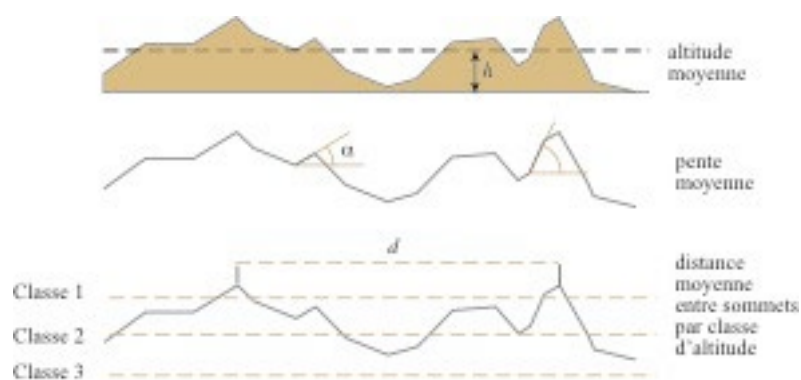


Fig. 2.23 Représentation statistique de la rugosité selon trois paramètres.

2.8 Géomorphométrie – Approche locale

L'approche locale recouvre les fonctions de calcul de variable décrivant une *propriété locale* du relief, par exemple la *pente*, l'*orientation*, la *concavité* ou la *convexité*.

2.8.1 Calcul des variables par fenêtre mobile

L'approche locale peut être assimilée à une procédure de filtrage par fenêtre mobile dont le résultat est la variable souhaitée. Il y a donc plusieurs manières de la mettre en pratique en faisant varier la *taille* et la *forme* de la fenêtre glissante comme l'illustre la figure 2.24.

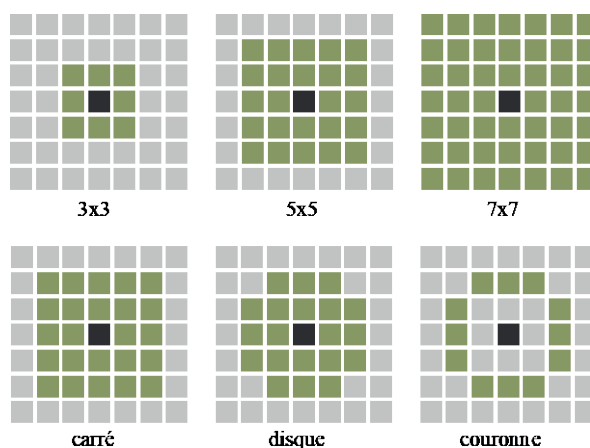


Fig. 2.24 Fenêtre mobile variant en taille et forme.

La fenêtre mobile étant toujours centrée sur la maille à transformer, le calcul rencontre des impossibilités pour les lignes et colonnes des bords souvent dénommées *effets de bord* (fig. 2.25). Si par défaut, le système affecte la valeur zéro aux endroits où l'information est absente, la valeur produite est évidemment erronée. Une manière simple d'éviter cette difficulté est d'opérer les calculs sur un MNA plus grand que la zone d'étude.

Notons encore que la plupart des logiciels du commerce n'offrent que des calculs selon une fenêtre mobile carrée.

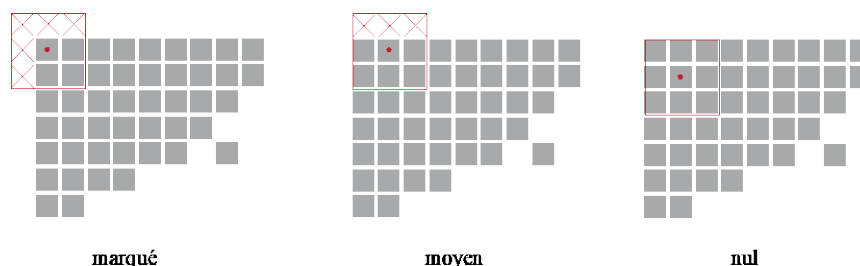


Fig. 2.25 Effet de bord selon la position de la maille calculée.

La taille de la fenêtre introduit un effet contextuel. Plus elle s'étend, plus la valeur calculée est influencée par l'environnement. Souvent, l'agrandissement de la fenêtre produit un lissage ou un effet structurant du relief. On l'interprète également comme une généralisation mais qui ne correspond pas à une réelle réduction de l'échelle d'observation. La figure 2.28 représentant la concavité et la convexité, calculées en fonction de deux tailles de fenêtre, illustre cet effet.

2.8.2 Variables du relief dérivées

Pente, orientation

La pente se définit comme *l'inclinaison d'une surface par rapport au plan horizontal* (Petit Robert) et l'orientation est une *direction déterminée par rapport aux points cardinaux*.

Du point de vue mathématique, la pente et l'orientation sont parfaitement définies en un point lorsque la surface est décrite par une fonction analytique (gradient de la surface).

$$z = f(x, y) \quad \text{pente} = \text{grad}(z) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2} \quad (2.2)$$

En mode image, c'est-à-dire discret, il est nécessaire de redéfinir ces deux paramètres pour chaque point. Quoique le principe reste le même, il existe plusieurs algorithmes pour les calculer selon le voisinage pris en compte. Le principe est évidemment le rapport entre l'élévation et la distance horizontale. Chaque méthode de calcul produit des résultats parfois différents les uns des autres. Pour certaines applications, ces différences ne portent pas à conséquence. Il convient cependant d'être prudent et de choisir l'algorithme le mieux approprié à l'étude entreprise. La figure 2.26 présente différents modes de calcul, du plus simple au plus complexe. Notons que les modèles de Zevenbergen et Thorne sont parmi les plus fréquemment cités dans la littérature.

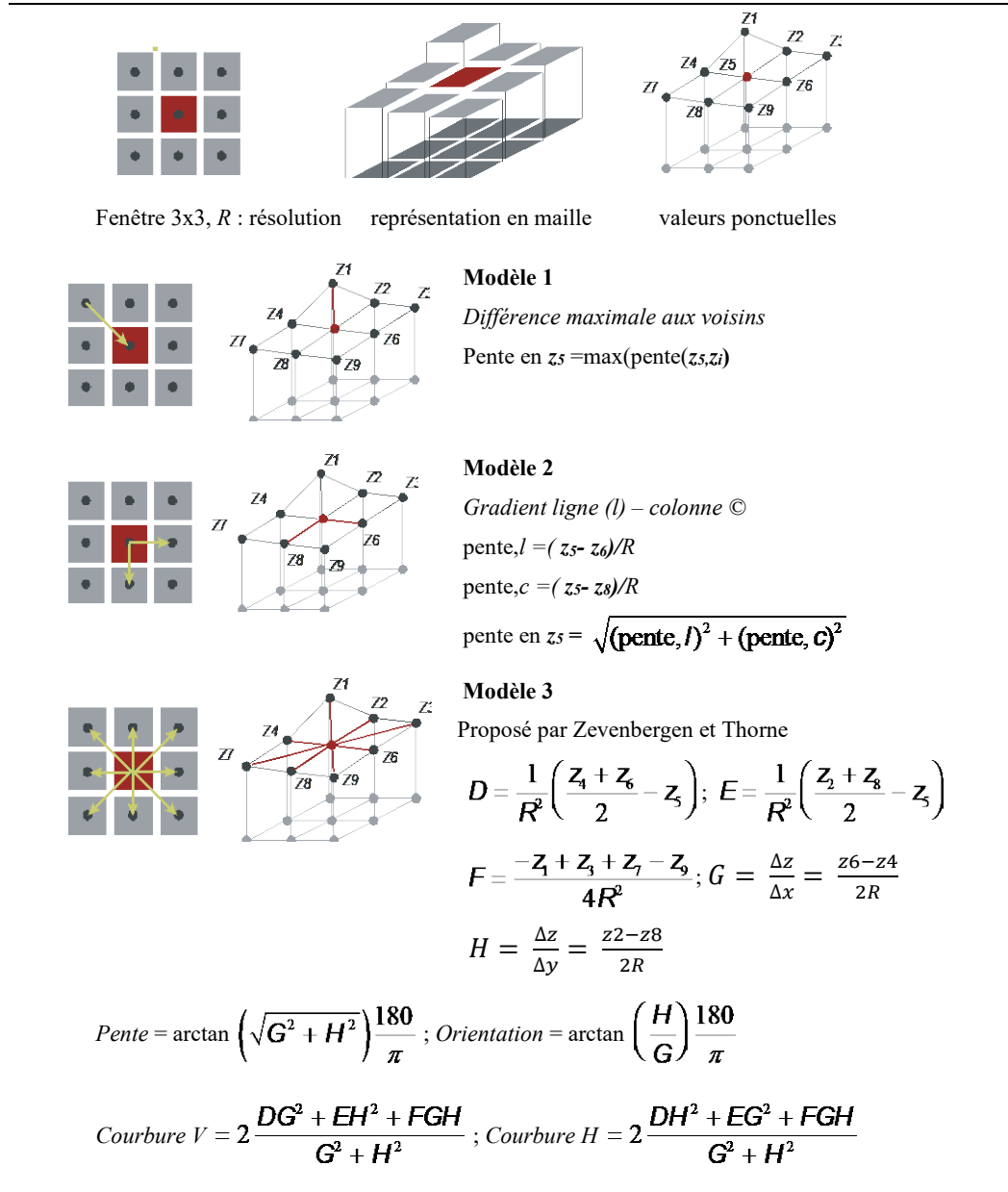


Fig. 2.26 Différents modes de calcul de la pente.

Concavité, convexité

Une surface est dite *convexe* ou *concave* lorsqu'elle est située tout entière du même côté d'un plan tangent (fig. 2.27). Dans le premier cas, la courbure est positive, dans l'autre négative.

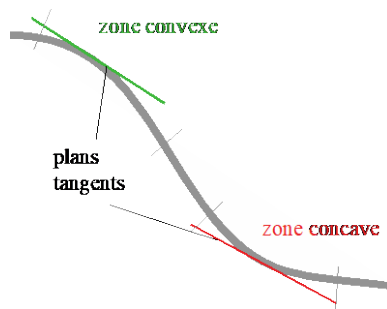


Fig. 2.27 Convexité et concavité.

La forme du relief influence les processus d'érosion et, par voie de conséquence, la nature des sols accumulés au bas d'une pente. Une pente convexe subit une érosion plus forte qu'une pente concave. Il y a donc intérêt pour une cartographie des sols ou pour tout autre cartographie de paramètres sensibles au processus d'érosion, de déterminer les zones caractérisées par une courbure convexe ou concave.

La convexité et la concavité interviennent également pour caractériser un glissement de terrain (fig. 2.28). La partie haute est la zone d'*arrachement* et la partie basse, le *front* du glissement. Pour le décrire, on détermine la concavité et la convexité selon les deux directions verticale et horizontale.

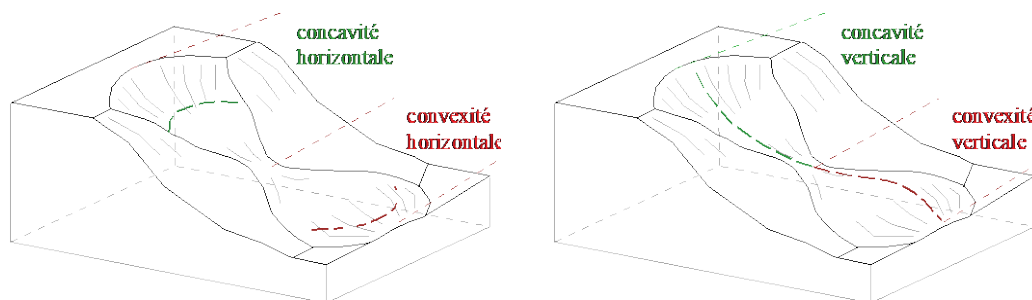


Fig. 2.28 Concavité et convexité horizontales – Concavité et convexité verticales.

La cartographie de la convexité et de la concavité est très sensible à la variation de la taille de la fenêtre. Plus la fenêtre est grande, plus l'espace environnant est pris en compte. Selon le mode de calcul, l'augmentation de la taille de la fenêtre produit un lissage de la pente ou de l'orientation, pour la concavité et convexité, elle produit un *effet structurant*.

Les deux figures 2.29 montrent l'effet structurant (*mise en évidence des formes dominantes*) produit par l'utilisation de fenêtres de taille croissante.

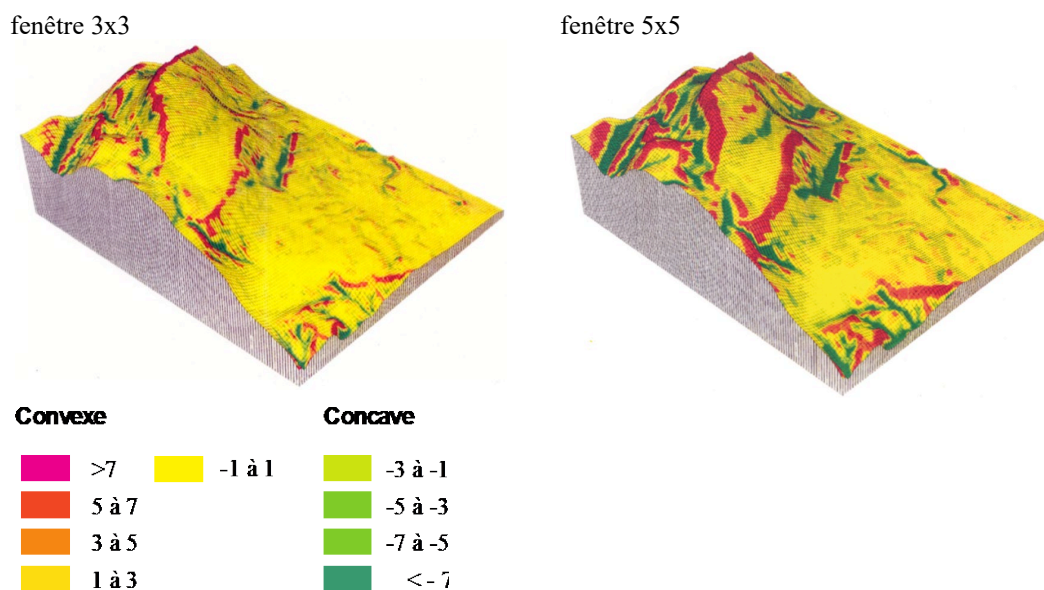


Fig. 2.29 Effet structurant produit par le calcul de la convexité et de la concavité selon une taille de fenêtre croissante.

2.9 Variables thématiques dérivées

L'altitude constitue également la variable primaire pour déterminer des zones qui du fait de leur situation, de leur orientation et de leur pente sont recherchées ou, au contraire, évitées. Plusieurs thèmes sont ainsi dérivés de la variable altitude dont les principaux sont la visibilité, l'ombre portée, l'ombre projetée, le taux d'ensoleillement, les lignes de drainage et les limites de bassin versant.

2.9.1 Visibilité

L'analyse de *visibilité* s'attache à déterminer les zones visibles depuis un point de vue donné. La technique se base sur l'analyse des lignes de vue par rapport au relief (fig. 2.30).

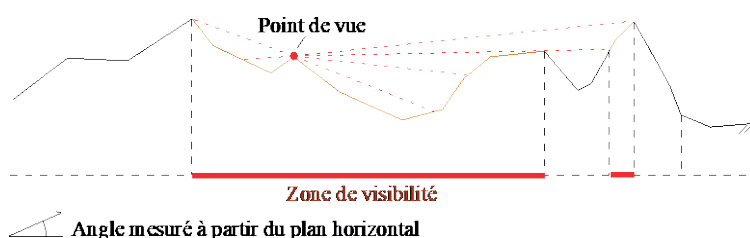


Fig. 2.30 Détermination de zones visibles d'un point de vue.

Cette fonction intervient fréquemment dans l'analyse du paysage. De quelles zones une nouvelle construction sera-t-elle visible ? Qu'est-ce qui apparaît dans le champ visuel à partir d'un lieu donné ?

Une application importante est également apparue avec la téléphonie mobile. La puissance de rayonnement des antennes étant limitée, émetteur et récepteur doivent rester « en visibilité ». La figure 2.31 reproduit les zones de visibilité d'une antenne. Les zones de ton brun uniforme reçoivent un signal fortement atténué, voire indétectable.

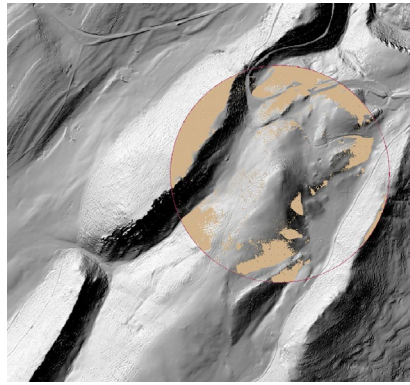


Fig. 2.31 Zones de réception d'une antenne mobile. L'antenne est placée au centre du cercle. Les zones en brun ne sont pas dans le champ de visibilité. La réception risque d'être faible ou nulle.

2.9.2 Ombre portée et ombre projetée

Ombre portée

L'ombrage des modèles numériques de terrain permet de représenter l'information d'altitude sous une forme offrant la perception du relief. La technique mise en œuvre est le calcul de ligne de vue dans une direction donnée à partir de la position de la source lumineuse. Cependant, on se contente souvent de griser, selon l'intensité de la pente, les zones d'orientation opposées à celle de la source lumineuse, par exemple le soleil présentant une *inclinaison supérieure* à celle des rayons solaires. L'ombre est dite *portée*. La figure 2.32 en présente le principe et la figure 2.33 un exemple d'application.

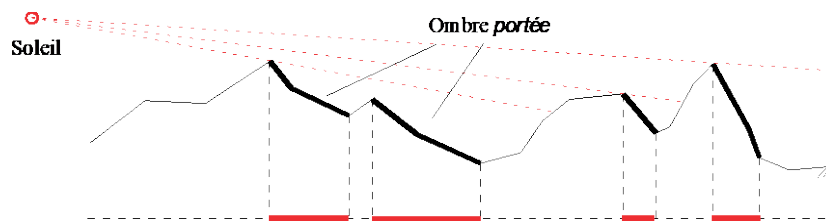


Fig. 2.32 Représentation schématique de l'ombre portée.

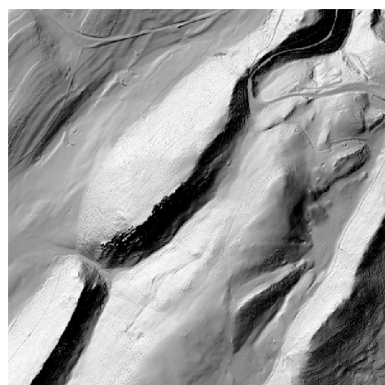


Fig. 2.33 Représentation du relief avec l'ombre portée.

Ombre projetée

Si l'on détermine l'ombre réelle produite par le relief faisant écran à l'éclairement solaire, l'ombre est dite *projetée* (fig. 2.34).

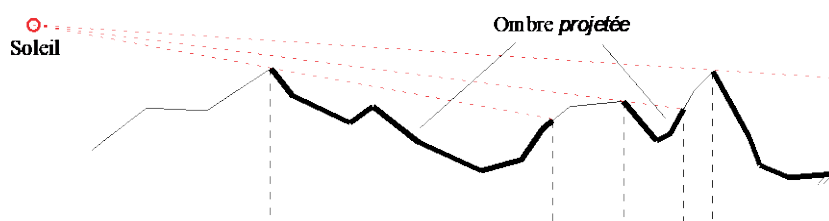


Fig. 2.34 Représentation schématique de l'ombre *projetée*.

2.9.3 Taux d'ensoleillement

L'analyse du rayonnement potentiel, c'est-à-dire de l'ensoleillement reçu sans tenir compte d'une éventuelle couverture nuageuse, repose sur une approche similaire à celle utilisée pour le calcul des ombrages; elle prend en considération les *ombres projetées*.

Chaque maille, correspondant à un point du MNA, reçoit un ensoleillement qui dépend de la *hauteur du soleil*, de la *transparence de l'atmosphère*, de la *pente* et de l'*orientation* ainsi que de la *ligne d'horizon*. Le résultat est donné en kWh/m², il ne tient pas compte de la nébulosité, celle-ci ne pouvant être connue pour chaque pixel durant la période examinée. Il s'agit donc de l'*énergie potentielle* reçue du soleil.

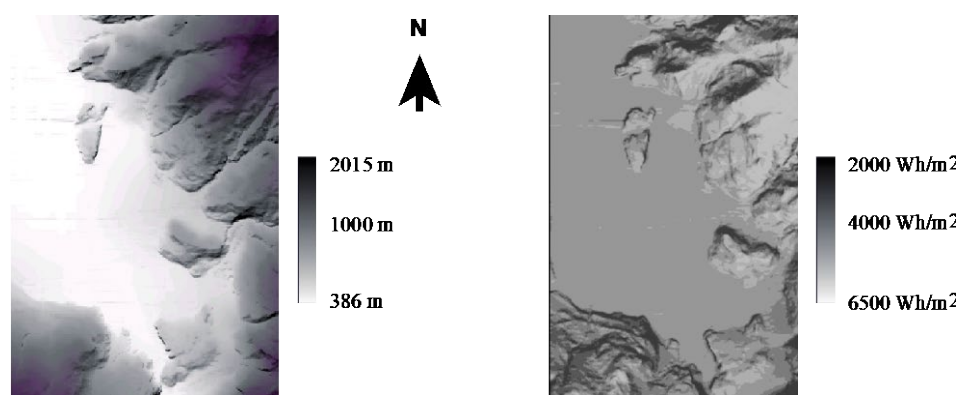
La technique repose sur la définition en tout point de la grille d'un horizon (fig. 2.35)



Fig. 2.35 Horizon tel que « vu » d'un pixel.

Il existe sur le marché plusieurs logiciels offrant cette fonction, notamment le logiciel libre *Solar Analyst* produit par l'Université du Minnesota fonctionnant comme module d'*Arcview* (ESRI).

La figure 2.36 reproduit l'énergie radiative potentielle du soleil reçue sur le relief et calculée sur la base du MNA 25.



(a) MNA.

(b) Énergie solaire cumulée durant la journée du 6 juillet 2000.

Fig. 2.36 Ensoleillement calculé à l'aide du MNA25 (© Swisstopo).

2.9.4 Ligne de drainage

Une ligne de drainage est le chemin théorique qu'une goutte d'eau tombant sur le relief est censée parcourir jusqu'à l'exutoire du bassin versant. On suppose évidemment que la surface est lisse et imperméable.

On calcule la pente en chaque point du MNA (fig. 2.37). On part ensuite de chaque point haut du bassin versant (point appartenant à la ligne de crête). Les lignes d'écoulement sont déterminées de proche en proche selon la ligne de plus forte pente. De l'ensemble des lignes ainsi tracées on déduit la *densité de drainage*.

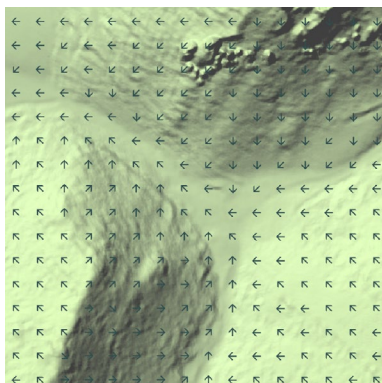


Fig. 2.37 Ligne d'écoulement selon la plus forte pente.

Ce paramètre est surtout utilisé en hydrologie; il a été défini par Horton comme étant la *longueur totale des cours d'eau d'un bassin versant par unité de surface*. On a établi des corrélations de ce paramètre avec le débit moyen de la rivière, avec la précipitation moyenne annuelle avec la production de sédiments. La densité de drainage se calcule aisément à partir d'un SIG contenant un MNA et le réseau hydrographique.

Conclusion

L'avènement du numérique a remplacé la vision du relief par un modèle d'altitude (MNA ou MNT). D'abord dérivé des cartes topographiques conventionnelles, les nouvelles technologies d'acquisition ont produit de nouveaux modèles d'une précision et d'étendue incomparables avec les précédents. Basés sur des radars altimétriques aéroportés ou satellisés ou sur des systèmes à balayage laser, ces instruments ont permis une expression du relief à des résolutions, moyenne pour l'ensemble des terres émergées et très haute pour des zones particulières. La densité de points d'altitude pour ces dernières a rendu possible l'étude du micro relief dont ont profité notamment les géologues, les archéologues et les urbanistes.

Toutes les disciplines associées à la gestion du territoire y trouvent ainsi des informations indispensables pour la qualité des analyses et des décisions proposées. Les changements climatiques auxquels nous assistons rendent plus urgente encore la maîtrise des phénomènes dans lesquels le relief joue un rôle prépondérant.

Étant donné la qualité des données altimétriques atteinte aujourd'hui, on peut légitimement penser que les évolutions technologiques ne vont plus apporter de bouleversement dans ce sens. Elles vont, cependant, permettre un accès plus facile à l'acquisition d'altimétrie à très haute résolution pour des régions du monde qui n'y accèdent pas par manque de moyens financiers.

Phénomènes spatiaux discontinus

Les phénomènes spatiaux discontinus se rapportent à la modélisation en objets de l'espace géographique. Les propriétés associées se déclinent en trois dimensions : géométrique, thématique et spatiale. Les propriétés des objets spatiaux sont décrites par des indices selon leur forme, leur taille, la distribution spatiale ainsi que par le degré éventuel de dépendance spatiale. Tous ces indices interviennent, selon le contexte de l'étude, pour caractériser un paysage.

Un objet spatial est rarement totalement indépendant des objets qui l'entourent. Au contraire, pour des raisons historiques ou d'influence de voisinage, des unités spatiales jouissent de propriétés communes et sont susceptibles de former des groupes. On aborde ces relations par l'analyse structurale de phénomènes discontinus. La méthode consiste à déterminer l'éventuelle autocorrélation spatiale selon deux approches : l'indice global de Moran et l'indice local LISA (*Local indicators of spatial association*).

Les conditions et les processus de régionalisation et de généralisation des informations spatiales liées aux trois catégories d'objets sont examinées ensuite: ponctuelle, linéaire et zonale. Ces opérations sont des inférences dans la mesure où il s'agit d'étendre les propriétés d'un lieu à un autre pour lequel on ne dispose pas d'information.

3 Phénomènes spatiaux discontinus

3.1 Coefficient d'autocorrélation ou indice I de Moran : définition et nature de l'indice

En toute rigueur, nous devrions définir des indices différents pour chaque échelle de mesure. En fait, pour le niveau ordinal, on admet que les intervalles de rang ont la même valeur de sorte que l'indice associé est calculé de la même manière que celui d'une variable continue (cardinale).

Le coefficient d'autocorrélation de Moran, appelé aussi *indice de Moran* I_M , caractérise l'arrangement spatial d'unités selon les valeurs d'un thème donné ; par exemple, la prévalence d'une maladie dans des communes d'une même région, le taux d'imposition, le taux de croissance de la population sur une période donnée, etc.

L'indice de Moran exprime l'importance de la différence des propriétés (valeurs) entre toutes les paires (z_k, z_i) de zones contiguës. Il est défini par le rapport entre *la covariance de la propriété par rapport à la moyenne de la variable étudiée et sa variance sur la région*. Étant un coefficient d'autocorrélation sa valeur varie entre -1 et $+1$. Son équation s'écrit :

$$I_M = \frac{\text{Covariance}}{\text{Variance}} = \frac{1/C \sum \omega_{i,j} (z_i - \bar{z})(z_j - \bar{z})}{1/n \sum (z_i - \bar{z})^2} = \frac{n \sum (z_i - \bar{z})(z_j - \bar{z})}{C \sum (z_i - \bar{z})^2} \quad (3.1)$$

où n : nombre d'unités spatiales.

C : nombre de connexions.

z_i : valeur de la variable pour l'unité i .

$\omega_{i,j}$: poids de la connexion, 1 si les unités sont adjacentes, 0 dans les autres cas.

Un indice de Moran *positif* signifie que les unités spatiales possédant des propriétés proches ont tendance à être voisines. L'arrangement est donc de type *groupé*. *La proximité spatiale entraîne une proximité des propriétés*.

Un indice de Moran *néгатif* signifie un arrangement *dispersé* en référence au thème étudié. *La proximité spatiale entraîne une grande différence des propriétés*.

Le taux de croissance démographique entre 1950 et 2000 est-il uniforme ou présente-t-il des zones de concentration? A titre d'exemple, nous présentons le cas de la région de La Côte, composée d'une soixantaine de communes en bordure du lac Léman, représentée sur la figure 3.1. Cette région a connu une forte croissance économique durant la même période.

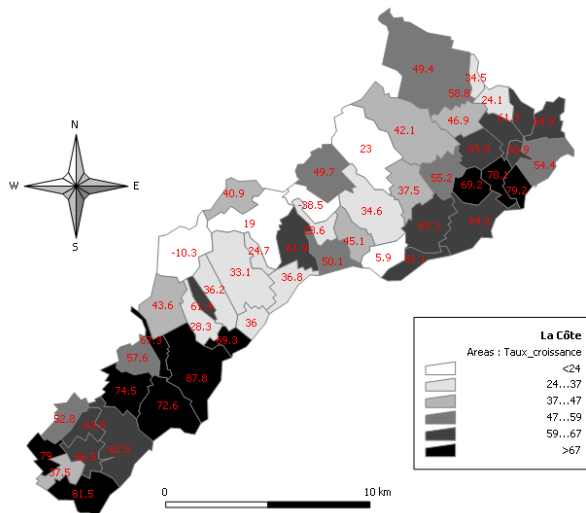


Fig. 3.1 Localisation des 61 communes de la région de la Côte avec leur taux de croissance démographique entre 1950 et 2000.

L'indice de Moran sur la région, calculé au moyen du logiciel Geoda prend la valeur de 0,3694. Étant positif, on déduit que l'arrangement spatial est de type *concentré*, c'est-à-dire que les communes ayant un taux de croissance similaire ont tendance à être proches. Mais cette valeur de l'indice est-elle statistiquement significative? Pour répondre, il faut procéder à un test. Nous adoptons une nouvelle fois la fonction z utilisée dans le cas précédent d'une variable nominale.

3.2 Test de significativité statistique

Il s'agit donc de calculer la moyenne ou espérance mathématique du premier ordre $E(I_{M,al})$ et l'écart type $\sigma_{I_{M,al}}$ que prendrait une distribution aléatoire. Il y a deux manières de procéder : l'approche analytique et la méthode de Monte-Carlo. Nous présentons ici uniquement l'approche de Monte-Carlo.

Méthode de Monte-Carlo

Par un nombre élevé de tirages, d'une centaine à plusieurs milliers, on permute, de manière aléatoire, les valeurs du thème considéré sur l'ensemble des unités. Pour illustrer ce propos, la méthode est appliquée au cas des 61 communes décrit précédemment au moyen du logiciel Geoda.

Plus le nombre de tirages est élevé, plus la distribution apparaît normale et plus l'écart type est censé s'approcher de sa valeur théorique (fig. 3.2). L'indicateur de *significativité statistique* ou *p-value* (barre jaune), calculé pour la configuration observée, diminue également au fur et mesure que la distribution tend vers la normale théorique ; p-value se traduit en français par *seuil ou valeur limite de rejet*.

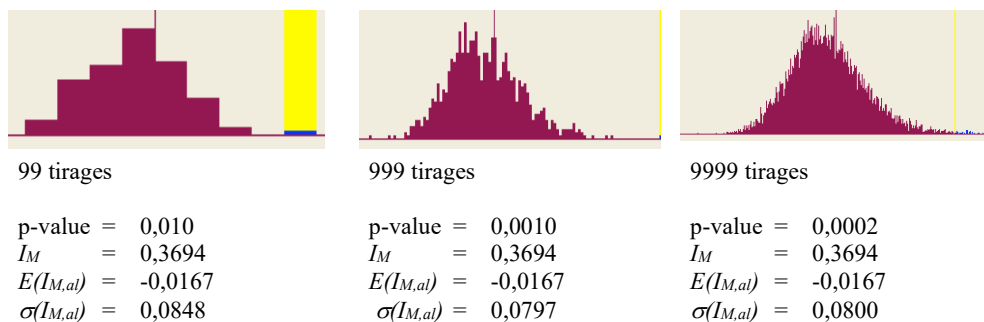


Fig. 3.2 Évolution de la distribution statistique de l'indice de Moran selon le nombre de tirages.

Une p-value de 0,01 signifie que le risque d'erreur de rejeter H_0 est de 1%.

Écart à l'hypothèse nulle avec seuil de confiance

La probabilité d'un tirage donnant l'arrangement observé est, selon l'équation de la distribution normale centrée réduite :

$$Z_{I_{M,obs}} = \frac{I_{M,obs} - E[I_{M,al}]}{\sigma_{I_{M,al}}} \quad (3.2)$$

avec

$I_{M,obs}$: valeur de l'indice de Moran calculé sur la distribution observée ;

$E(I_{M,al})$: moyenne théorique de l'indice I estimée pour une distribution spatiale aléatoire ;

$\sigma_{I_{M,al}}$: écart type de la distribution aléatoire théorique.

En introduisant les valeurs obtenues par le nombre le plus élevé de tirages, $Z_{I_{M,obs}}$ vaut 4,83. Pour un test bilatéral à 5% et selon la table de la distribution Z, $z_{crit} = -1,96$, donc $|z_{obs} > z_{crit}|$ par conséquent H_0 peut être rejetée avec un risque d'erreur de 5%. La distribution observée est ainsi, d'un point de vue statistique, significativement différente d'une distribution aléatoire, elle est donc de type dispersé.

3.3 Indicateurs locaux d'arrangement spatial - LISA

L'indice de Moran caractérise une région par une *seule valeur*. Il est donc de nature *globale*, c'est-à-dire qu'il intègre en une seule valeur l'ensemble des propriétés de voisinage des unités considérées. S'il présente l'avantage d'être relativement peu sensible aux valeurs aberrantes, comme tout indicateur de centralité, il ne donne aucune information sur les variations locales de l'indice et sur sa dispersion. Il se peut que certaines parties de la région présentent un arrangement spatial dispersé alors que d'autres appartiennent au type groupé. L'indice global ne représente donc une information exploitable que si la région d'étude est relativement homogène. Mais, généralement, elle ne l'est pas.

Ce constat a motivé Luc Anselin à développer une approche locale connue sous sa dénomination anglaise, le *LISA*, pour *Local Indicators of Spatial Association*, dont la traduction française est *indicateurs locaux d'arrangement ou d'association*. Son principe est simple, l'indice de Moran est calculé pour chaque unité en fonction de son voisinage.

Comme la majeure partie des méthodes et opérateurs d'analyse spatiale, les LISA font partie de l'*analyse spatiale exploratoire*. Il s'agit de réunir le maximum d'informations à propos du problème spatial posé pour induire une compréhension plus générale du thème traité. On accorde ainsi beaucoup d'importance aux indicateurs statistiques qui expriment le degré de confiance et d'importance que l'on peut accorder aux informations acquises.

Les fondements mathématiques des LISA sont issus de nombreux travaux dont les principaux à l'origine sont notamment ceux de Moran [1948], Geary [1954], Cliff et Ord [1973, 1981], Getis et Ord [1992, 1995]. La littérature spécialisée s'accorde à attribuer à Anselin (1995) la synthèse et la mise en forme opérationnelle des LISA. Lui-même cite les travaux antérieurs de Getis *et al.* [1981] de Getis et Ord [1992, 1995], Anselin [1993].

Notre présentation se restreint ici au cas d'unités spatiales irrégulières pour lesquelles seule la matrice de contiguïté est prise en compte. Dans ce cas, le poids est égal à 1 lorsque les unités sont contiguës et 0 pour les autres.

Anselin formule deux principes pour l'établissement d'indicateurs locaux d'autocorrélation spatiale :

- Autour de l'unité observée, le LISA local détermine l'étendue d'une région (cluster) formée par les unités voisines qui possèdent des valeurs proches de la sienne.

- La somme des LISA locaux est proportionnelle à l'indicateur global, soit $\sum I_{M,j} = \gamma I_M$ avec γ comme facteur de proportionnalité. L'indice local se calcule de manière similaire à l'indice de Moran (équ. (3.18)) :

$$I_{M,j} = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_{i,j} (z_i - \bar{z})(z_j - \bar{z})}{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})} \quad (3.3)$$

Notons que pour le cas général où la distance entre les points est prise en considération, les poids prennent des valeurs comprises entre 0 et 1. Par conséquent, la deuxième condition pour le calcul des LISA exige qu'une normalisation des lignes de la matrice soit réalisée (voir à ce propos Smith et *al.*, [2008]).

Tant l'indice de Moran global que le LISA reposent sur l'hypothèse statistique de normalité. Il s'agit donc d'une inférence dont il est nécessaire de *tester la significativité statistique* des structures en cluster de la région. Le logiciel Geoda offre cette fonction. La p-value est calculée pour chaque unité. Plus elle est faible, plus l'éventuel cluster qu'elle forme avec ses voisins possède une existence statistiquement significative. Appliquée sur notre exemple, la cartographie des p-value est donnée sur la figure 3.3.

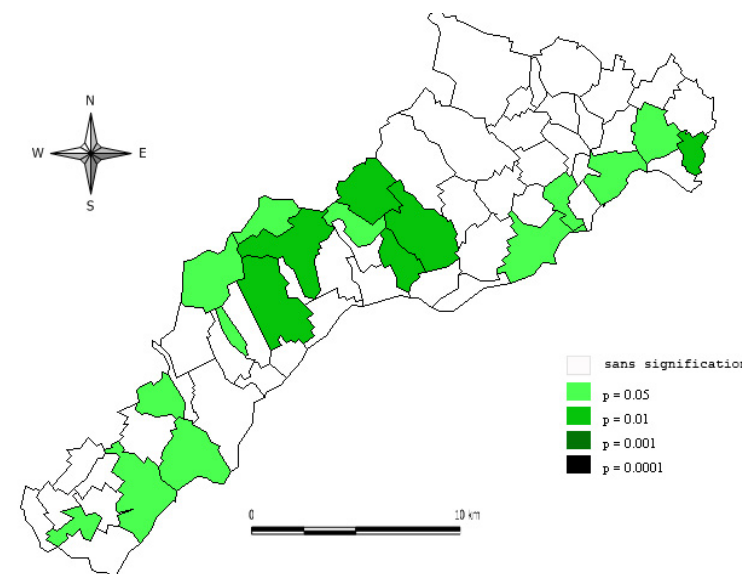


Fig. 3.3 Carte de significativité statistique par unité spatiale.

Ici, le vert clair indique la probabilité la plus élevée soit $p=0,05$, les unités concernées atteignent donc le seuil minimal de rejet; les unités en vert foncé sont les plus corrélées.

Diagramme de dispersion

La carte de significativité statistique s'accompagne d'une autre représentation de la variabilité locale de l'indice de Moran : le *diagramme de dispersion de Moran* (Moran scatterplot). Il est construit en ayant en abscisse la valeur z_i normalisée et en ordonnée la moyenne des z_j des unités adjacentes également normalisée comme représenté sur la figure 3.31. L'unité du diagramme est l'écart type.

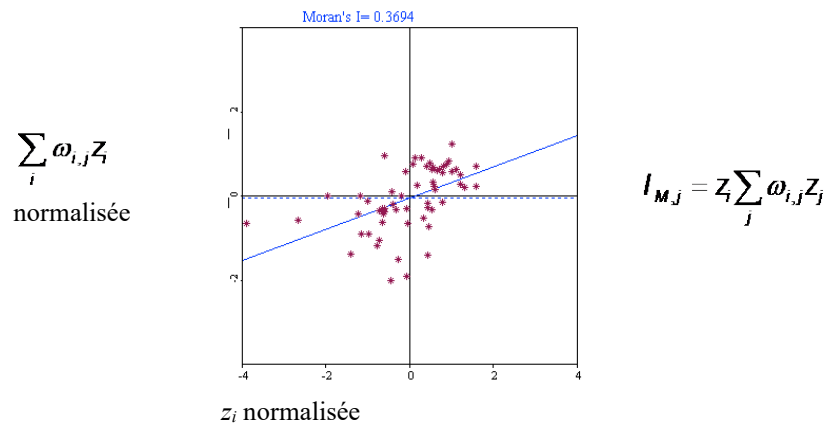


Fig. 3.4 Diagramme de dispersion ou scatterplot de Moran.

Le diagramme divise l'espace en 4 cadrans. Les unités appartenant à l'un ou l'autre des cadrans s'interprètent de la manière suivante :

- + L'unité connaît une valeur <i>négative</i> , ses voisines sont <i>positives</i>	+ + L'unité connaît une valeur <i>positive</i> , ses voisines <i>également</i>
- - L'unité connaît une valeur <i>négative</i> , ses voisines <i>également</i>	+ - L'unité connaît une valeur <i>positive</i> , ses voisines sont <i>négatives</i>

Le diagramme permet d'analyser chaque sous-région ou groupement d'unités (cluster) dans son environnement et de déterminer la ou les unités qui se comportent différemment des autres. En cas de valeur aberrante, il convient de les écarter de manière à ne pas biaiser les résultats statistiques. Pour davantage d'efficacité à cette analyse le logiciel Geoda *relie* le diagramme de Moran avec la carte de la région. En activant un point sur le diagramme, on identifie immédiatement l'unité à laquelle il correspond (fig. 3.5)

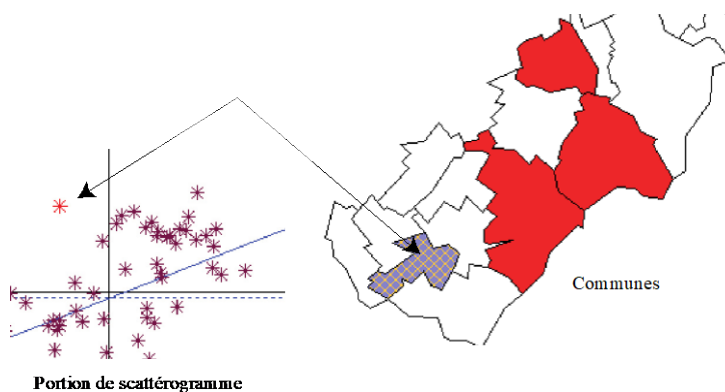


Fig. 3.5 Lien entre le scatterplot de Moran et l'unité correspondante sur la carte.

3.4 Commentaire

Un indice tel que décrit dans cette section ne caractérise pas, à lui seul, une unité spatiale ou un groupe d'unités spatiales. Il apporte une information partielle. Pour comprendre les propriétés d'une région, l'analyste procède de manière exploratoire. Il réunit un nombre suffisant d'informations pour dégager progressivement une appréhension plus globale qui le met à l'abri d'une interprétation arbitraire.

Phénomènes spatiaux continus

Un phénomène est dit *continu* dans l'espace s'il est défini en tout point de l'espace géographique et que ses propriétés varient localement de manière graduelle et structurée. L'*altitude*, l'*humidité d'un sol*, la *teneur* en métaux lourds ou autres polluants des sols en sont des exemples.

Ces données originales sont habituellement acquises par un échantillonnage ponctuel, aléatoire ou systématique. Pour étendre les données ponctuelles à l'ensemble du domaine, on procède par *inférence* spatiale, à l'aide de l'interpolation. Diverses questions se posent alors. Quelles sont les hypothèses qui autorisent une interpolation? Quelle(s) loi(s) appliquer?

Ce chapitre traite des modes d'échantillonnage, puis présente les fonctions d'interpolation dites déterministes car elles ne se basent sur aucune étude préalable du phénomène. Par contre la géostatistique (variables régionalisées, variographie, krigeage, estimation de l'erreur) n'est pas abordée dans ce cours.

4 Phénomènes spatiaux continus

4.1 De l'échantillonnage à la régionalisation

Un phénomène est dit *continu* s'il est défini en tout point de l'espace géographique et que ses propriétés varient localement de manière graduelle et structurée. Généralement, son comportement est exprimé par une variable mesurable telle que l'*altitude*, l'*humidité d'un sol*, la *teneur* en métaux lourds ou autres polluants des sols, la *température* de la surface du sol, la *granulométrie* ou encore la *luminance*, c'est-à-dire la puissance radiative émise ou réfléchiée par chaque élément de sol et exploitée pour établir de l'information géographique en mode image.

Mise à part la mesure de la luminance par les radiomètres imageurs opérée en continu et segmentée ensuite en pixels, les autres variables ne sont pas mesurées en tout point du territoire. Cette procédure serait formellement impossible. L'approche est réalisée par *échantillonnage* sous l'hypothèse qu'il est possible, par inférence, *d'estimer*, avec une *précision acceptable ou souhaitée*, les valeurs prises par la variable en d'autres points de l'espace considéré. Dans le langage courant, il s'agit d'une démarche de *régionalisation* obtenue par *interpolation*. Ce thème constitue l'objet principal de ce chapitre.

La difficulté d'une telle opération et les références théoriques des techniques mises en œuvre dépendent fortement de la nature du phénomène. On distingue, en fait, deux situations définies par le degré de connaissances préalables que nous possédons sur le phénomène. S'il s'agit de l'altitude par exemple, notre perception visuelle permet d'identifier la structure du relief, ses points hauts ou bas, ses arêtes, et de choisir, par conséquent même empiriquement, une fonction interpolatrice qui ne risque pas d'induire d'erreurs grossières. Il n'en est pas de même pour la teneur en minerais ou en métaux lourds dans des sols pollués, elle échappe totalement à notre perception visuelle. Les seules informations disponibles sont les mesures faites respectivement sur les carottages ou sur les prélèvements de sol. Comment alors estimer la valeur de la variable en un site quelconque ne faisant pas partie de l'échantillon? Une fonction interpolatrice choisie arbitrairement est susceptible de produire des résultats éloignés de la réalité et occasionner, dans le cas de l'extraction d'un minerai par exemple, des coûts élevés et inutiles. Le seul empirisme n'est donc pas satisfaisant; il y a lieu de chercher des solutions scientifiquement plus fondées.

La catégorisation conventionnelle en deux familles des fonctions interpolatrices reflète les deux situations décrites. On distingue: l'approche *déterministe* et l'approche *stochastique*.

Dans l'approche *déterministe*, l'analyste sélectionne la méthode d'interpolation qui lui paraît la plus conforme à la connaissance préalable du phénomène. Hormis la continuité spatiale de celui-ci, aucune hypothèse statistique n'est posée explicitement. Cependant, l'opération d'interpolation elle-même suppose que l'autocorrélation spatiale, c'est-à-dire la dépendance d'une mesure en un point à celle de ses voisins, est conforme à la loi d'interpolation choisie. Celle-ci étant fortement sujette à la subjectivité de l'analyste, il devient impossible d'estimer la précision des valeurs interpolées.

En revanche, l'approche *stochastique* suppose un phénomène à forte composante aléatoire. Toute interpolation, c'est-à-dire toute *inférence* doit reposer sur des hypothèses mathématiques rigoureuses. A l'opposé de la précédente, l'approche stochastique vérifie d'abord si l'autocorrélation existe et, dans l'affirmative, détermine son étendue, sa direction et sa fonction de dépendance spatiale. L'approche stochastique n'est pas abordée dans ce cours.

4.1.1 Définitions - Notations

Domaine

Le *domaine* recouvre la zone d'étude où le phénomène est censé exister et présenter un comportement similaire sur l'ensemble. Parfois ses limites sont connues, généralement, elle ne le sont pas ou seulement de manière approximative (fig. 4.1). Il est, dès lors, difficile, voire impossible, de calculer des indicateurs où l'aire intervient.

Une loi d'interpolation s'applique sur l'ensemble du domaine que l'on suppose, par hypothèse homogène dans le comportement du phénomène. Si on observe des hétérogénéités, la zone initiale est divisée en *sous-domaines* dont chacun est censé présenter des comportements considérés comme homogènes de sorte que la même loi d'interpolation puisse être utilisée. On procède ainsi à une *stratification* de la région d'étude.

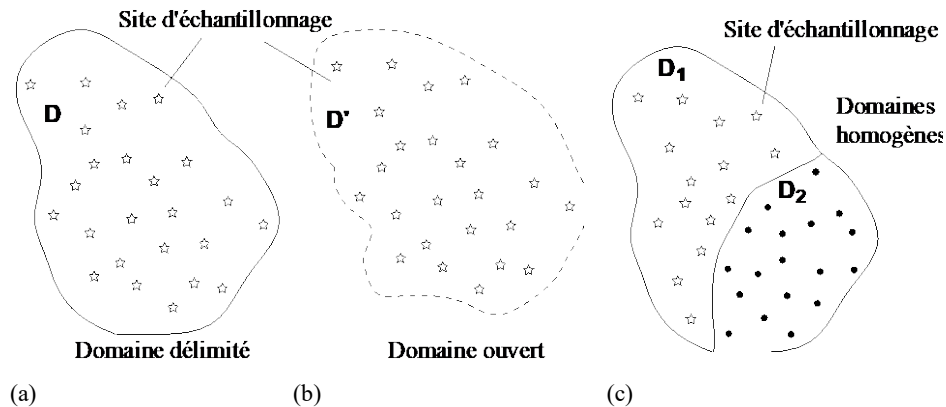


Fig. 4.1 Représentation schématique du domaine échantillonné : (a) avec limite connue, (b) avec limite indéterminée, (c) divisé en sous-domaines.

Cellule ou site

La cellule ou le site est la portion du domaine D , à laquelle est (sont) affectée(s) la ou les valeur(s) échantillonnée(s). Un site peut être *ponctuel* ou *surfactive*; cependant, la localisation choisie pour les calculs est toujours ponctuelle. Un site mesuré prend également la dénomination de *point d'appui*.

4.1.2 Rappels statistiques

On distingue deux approches pour les études statistiques : la statistique *descriptive* et la statistique *inférentielle*.

La statistique *descriptive* ou exploratoire caractérise un jeu de données (un échantillon d'observations) par des indicateurs qui synthétisent et structurent l'information. Ces indicateurs se divisent en deux catégories. Les indices de *centralité* que sont le mode, la moyenne, la médiane, et les indices de *dispersion* tels l'étendue (minimum, maximum), la diversité, les quantiles, la variance, l'écart type, la covariance, etc. En d'autres termes, on résume le jeu de données par une valeur jugée représentative et l'étendue des valeurs qui l'environnent. Un exemple simple est présenté ci-dessous.

Températures horaires en °C	:	19,4; 18,6; 18,1; 17,5; 17,3; 19,8; 23,9; 31,8; 31,2; 17,3; 27,4; 37,4; 37,7; 31,3; 31,5; 38,2; 33,6; 31,6; 29,9; 27,3; 25,6; 23,6; 21,7; 20,9
Maximum	:	38,2°
Minimum	:	17,3°
Moyenne journalière	:	26,4°
Écart type	:	6,97°

D'autres opérations servent à structurer, c'est-à-dire à simplifier le jeu de données. Il s'agit notamment de la *classification* qui forme des groupes que l'on peut considérer comme homogènes, de l'*analyse factorielle* qui tente de réduire le jeu de variables à celles les plus représentatives du phénomène.

La statistique *inférentielle* consiste à étendre les *propriétés de l'échantillon*, définies par la statistique descriptive, à l'ensemble de la population. Cette opération n'a de sens que si l'on est capable d'estimer le degré de représentativité de l'échantillon par rapport à cet ensemble.

En statistique *descriptive*, le comportement d'une variable est décrit par des indicateurs que l'on a groupé en deux catégories : les indices de *tendance centrale*, la moyenne, et les indices de *dispersion*, écart à la moyenne, écart type.

4.2 Procédures d'échantillonnage spatial

L'échantillonnage consiste à mesurer, sur la région d'étude, la valeur d'une variable en quelques points jugés représentatifs du phénomène analysé de manière à pouvoir, à l'aide de lois statistiques, extraire des indicateurs valables pour l'ensemble du domaine d'étude.

L'échantillonnage peut être *quasi exhaustif*. C'est le cas de la création d'image de télédétection. Le radiomètre mesure la luminance de chaque « pixel ». Le levé altimétrique par balayage laser appartient à la même catégorie car le nombre de points par m² est souvent bien supérieur à 1.

Ce n'est évidemment pas le cas pour les autres phénomènes cités.

Il y a plusieurs manières de procéder à un échantillonnage spatial qui dépendent, principalement, de la connaissance préalable dont nous disposons sur le comportement du phénomène. L'échantillonnage est dit *aléatoire* lorsque aucun schéma n'est appliqué, il est *systématique* dans le cas contraire.

Fréquemment, pour les phénomènes invisibles, on suit une procédure *exploratoire* pour appréhender progressivement le comportement du phénomène avant de passer à l'analyse structurale complète. Par exemple, l'échantillonnage se fait selon un schéma régulier (transect) ou aléatoire avec une densification progressive.

Un autre point auquel il convient d'être attentif est celui de la représentativité des valeurs thématiques de l'échantillon. La localisation d'un amer est toujours ponctuelle même si l'information concerne une surface car, pour le calcul, nous ne pouvons exploiter que la distance entre deux points. L'opération de rééchantillonnage en traitement d'image en est un bon exemple: l'interpolation est calculée en référence au centre du pixel. Un autre exemple est donné par les analyses de sol; il est fréquent de prélever plusieurs échantillons sur une zone et de les réunir pour obtenir une caractéristique moyenne, estimée plus représentative. Pour procéder à une éventuelle interpolation, le centre de gravité des prélèvements sert alors de référence spatiale ponctuelle.

4.2.1 Échantillonnage spatial aléatoire ou systématique

En l'absence de connaissance préalable sur le comportement du phénomène, la règle est de procéder par un échantillonnage exploratoire soit aléatoire, soit systématique. La figure 4.2 en illustre les variantes possibles.

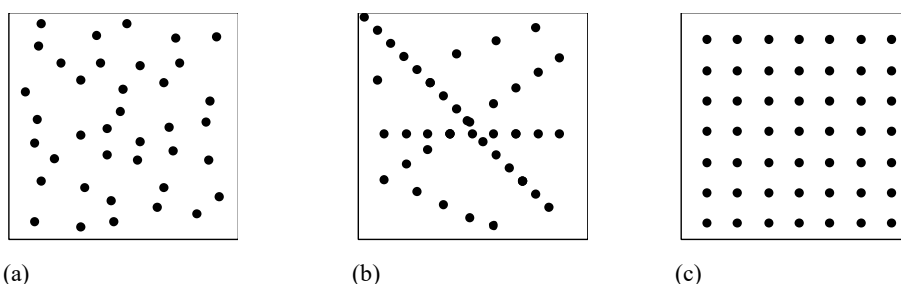


Fig. 4.2 Formes d'échantillonnage spatial : (a) échantillonnage aléatoire ; (b) systématique par transect ; (c) systématique (grille).

L'échantillonnage est dit *systématique* lorsqu'un schéma de prélèvement est établi préalablement. Ce schéma peut être un ou plusieurs transects, une grille régulière.

Selon un ou des transects

La première option est de procéder selon deux transects, par exemple perpendiculaires. Si l'on soupçonne une *anisotropie*, c'est-à-dire un comportement de la variable différent selon la direction, on

lève des échantillons selon plusieurs transects orientés différemment (fig. 4.2b). Au départ, le pas d'échantillonnage est choisi de manière arbitraire ou basé sur des cas connus similaires.

Selon une grille régulière

Le schéma est une grille régulière (fig. 4.2c). Le pas initial d'échantillonnage est également arbitraire.

4.2.2 Propriétés statistiques du domaine échantillonné

L'échantillonnage n'a de sens que s'il produit une connaissance valable pour l'ensemble du domaine. Sa qualité première est donc d'être *représentatif*.

Les statistiques établies sur les échantillons se limitent parfois à un objectif *descriptif*; si une régionalisation est prévue, l'objectif devient *inférentiel*. Seul le premier cas est traité ici.

L'échantillonnage relève de la théorie des sondages abondamment traitée dans les manuels de statistique. Le problème est d'étudier, dans chaque situation, les relations entre les propriétés de l'échantillon et celles de l'ensemble de la population, dans notre cas, du domaine étudié [Arnaud et Emery, 2000].

Un échantillonnage est considéré optimal s'il satisfait, notamment, aux deux conditions suivantes:

- Les limites du domaine ont été circonscrites selon des critères bien formulés.
- La répartition des échantillons est homogène sur l'ensemble du domaine D et de densité optimale, c'est-à-dire suffisante pour représenter la ou les propriétés recherchées.

Dans la pratique, ces conditions sont souvent remplies selon une procédure itérative : les limites sont progressivement fixées selon les résultats des sondages, la densité de l'échantillonnage est souvent arbitraire au départ et n'est pas uniformément répartie. L'opérateur densifie les prélèvements aux endroits qu'il juge plus sensibles à ce qu'il cherche.

4.3 Méthodes d'interpolation déterministes

Par les indicateurs statistiques, l'échantillonnage fournit certes des informations globales sur le domaine D . Mais, son intérêt principal est de permettre d'estimer la valeur de la variable en tout point. C'est l'opération bien connue d'*interpolation*. Quelle que soit son mode opératoire, une interpolation est une *inférence*, c'est-à-dire une prédiction arbitraire ou justifiée d'une valeur de la variable en point non mesuré.

Cette section traite des méthodes d'interpolation dites *déterministes* pour lesquelles aucune étude statistique sur le comportement de la variable n'est opérée. Le choix de la méthode repose sur l'expérience de l'analyste, c'est-à-dire sur les connaissances qu'il possède à propos du phénomène. Ces connaissances sont issues, dans certains cas, d'un consensus qui s'est établi progressivement tel que la loi $1/d^2$ décrivant la diminution de l'influence d'une ville en fonction de la distance d , la relation linéaire de la température en fonction de l'altitude.

Le cas des TIN (*Triangulated irregular network*) est particulier puisque les points échantillonnés appartiennent aux lignes de structure du phénomène ou aux endroits spécialement sélectionnés pour leur représentativité.

La situation la plus fréquente est la transformation du semi de points mesurés en un nouveau jeu de points organisés en grille régulière (fig. 4.6). Les valeurs aux nœuds de la grille sont donc estimées par interpolation.

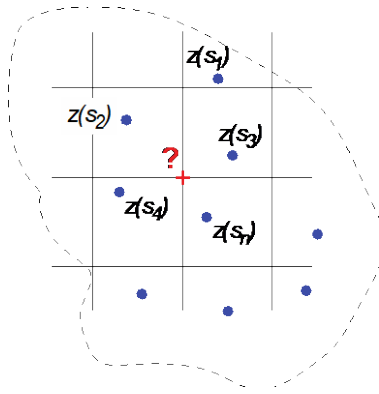


Fig. 4.3 Schéma d'interpolation avec le site marqué par ?, dont on souhaite estimer la valeur $z(s_i)$ de la variable en fonction de celles des sites voisins.

Les méthodes d'interpolation déterministes se partagent en deux catégories :

- les méthodes *globales*.
- les méthodes *locales*.

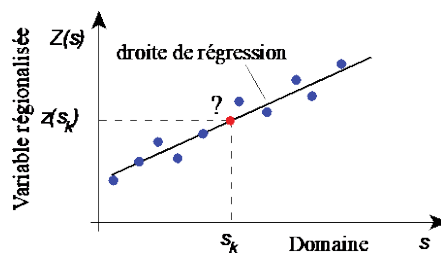
Certaines, comme celles basées sur les fonctions « *spline* », appartiennent, comme nous allons le voir plus loin, aux deux catégories.

4.3.1 Méthodes globales

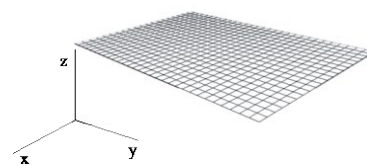
La méthode est dite *globale* si le modèle spatial du phénomène est construit en prenant en compte *tous les points de mesure*.

Interpolation par régression polynomiale

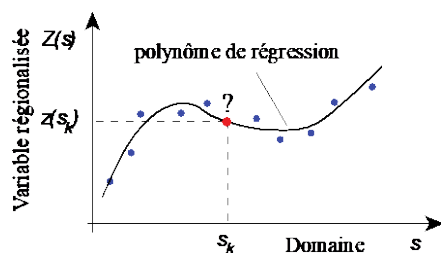
La méthode générale consiste à calculer un polynôme de degré 1 (fig. 4.7 a, d) ou supérieur (fig. 4.7 c, d) qui minimise les écarts aux points de mesure selon la méthode connue des moindres carrés. Ces surfaces, représentatives du comportement moyen du phénomène dans le plan des coordonnées x, y , ont reçu le nom de *surfaces de tendance*. Le symbole Z désigne ici la variable mesurée et non pas l'altitude.



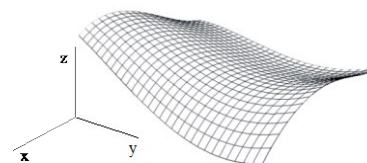
(a) Régression simple linéaire



(b) Régression multiple linéaire,



(c) Régression simple polynomiale



(d) Régression multiple polynomiale
 $z = f(x, y)$

Fig. 4.4 Interpolation sur la base d'une régression linéaire et polynomiale.

Les méthodes globales sont utilisées pour analyser des *tendances* de distribution spatiale du phénomène dans le domaine. Les modèles de référence un plan ou une surface de degré 2 ou 3, sont trop simples dans la très grande majorité des cas pour fournir une approximation réaliste de sa distribution spatiale. Des surfaces de degré très supérieur à 5 ne sont guère aisées à calculer, c'est pourquoi les méthodes d'interpolation locale sont préférées. L'autre raison, plus fondamentale est qu'il n'est guère utile de faire intervenir des points d'appui au-delà de la distance seuil d'autocorrélation, car la dépendance spatiale est par hypothèse locale et non globale.

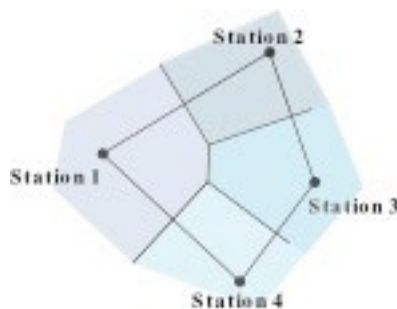
4.3.2 Méthodes d'interpolation locales

Les méthodes d'interpolation locales ne prennent en compte qu'un nombre limité de points d'appui au voisinage du point à estimer. De surcroît, elles permettent d'attribuer des poids particuliers à chaque point d'appui, notamment en fonction de la distance.

Plusieurs méthodes ont été élaborées. Le choix dépend de la densité de l'information que l'on possède, des précisions souhaitées, de l'objectif particulier de l'interpolation et, comme il a été dit plus haut, de la connaissance préalable du comportement du phénomène.

Méthode du plus proche voisin

La valeur attribuée en un point quelconque du domaine est celle de son plus proche voisin. Les zones, correspondant à des polygones de Thiessen, sont établies par les médiatrices tracées des segments reliant deux stations. Tout point à l'intérieur d'un polygone est donc censé prendre la même valeur (fig. 4.8).



La couleur correspond à l'intensité moyenne mesurée par chacune des stations.

Fig. 4.8 Méthode du plus proche voisin ou dite de polygones de Thiessen appliquée pour l'estimation de la pluviométrie.

Cette méthode transforme le phénomène *continu* en un modèle spatialement *discret*.

4.3.3 Méthode par réseau de triangles (TIN)

Rappelons qu'un réseau de triangles TIN (*Triangulated Irregular Network*) est formé en reliant les points d'appui entre eux de manière à former un réseau de mailles triangulaires (fig. 4.9).

La variation du paramètre à l'intérieur de chaque triangle est donc supposée linéaire.

L'interpolation est réalisée en établissant l'équation du plan (équ. 4.9) formé par chacune des facettes triangulaires :

$$z = ax + by + c \quad (4.1)$$

Il y a 3 inconnues, les coefficients a , b , c . Ils sont déterminés par les valeurs connues des 3 sommets du triangle.

La création des mailles triangulaires est réalisée généralement par la méthode dite de *Delaunay* dont la particularité est de créer des triangles dont les angles ne sont pas supérieurs à 90° .

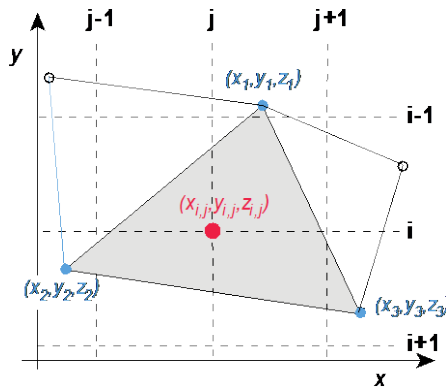


Fig. 4.9 Interpolation d'un point d'une grille régulière par la méthode du réseau de triangles.

Lors de la constitution de l'échantillon, l'opérateur choisit en général des points caractéristiques (sommets de crêtes, talweg ou tout autre point de rupture de pente). Il s'agit d'un échantillonnage dirigé de manière à créer un modèle le plus proche de la réalité. A l'origine, l'interpolation par TIN a été développée en cartographie traditionnelle pour créer, manuellement, des lignes d'isovaleurs (isolignes), notamment les courbes de niveau du relief à partir d'un ensemble de points de mesure.

4.3.4 Interpolation par moyenne mobile pondérée (*Inverse Distance Weighting*)

L'estimation de la variable est calculée en s'appuyant sur les valeurs de quelques points mesurés dans le voisinage et en leur attribuant un poids (fig. 4.13) en fonction de la distance notamment. Cette approche correspond bien à notre intuition : un point éloigné a moins d'influence qu'un point plus proche!

Cette méthode, simple dans sa formulation, pose en fait les questions qui ne recevront une réponse scientifiquement correcte que par une approche exploratoire préalable comme nous le verrons à la section 4.7.

Quelle taille de voisinage faut-il choisir ? Combien de points d'appui convient-il de prendre en compte ? Quel poids respectif convient-il de leur accorder ? Faut-il tenir compte de l'orientation relative ? La réponse à ces questions essentielles varie en fonction de la région d'étude, du phénomène considéré et de la configuration de l'échantillon des points de mesure.

En approche déterministe, l'analyste se base sur sa propre expérience pour fixer des valeurs aux paramètres invoqués.

Pour les poids par exemple, on considère que plus un point mesuré est éloigné du point à interpoler moins il a d'influence. On choisit, dans ce cas, une fonction inverse de la distance ou inverse du carré de la distance ou d'une puissance plus élevée.

L'étendue du voisinage ou, en d'autres termes, le nombre de points de contrôle retenus pour l'interpolation est laissé à l'appréciation de l'opérateur.

Au cas où la répartition des points de contrôle n'est pas uniforme autour des points à estimer, certains auteurs ont proposé une division de la fenêtre en quadrants, dans lesquels on prend un nombre identique de points.

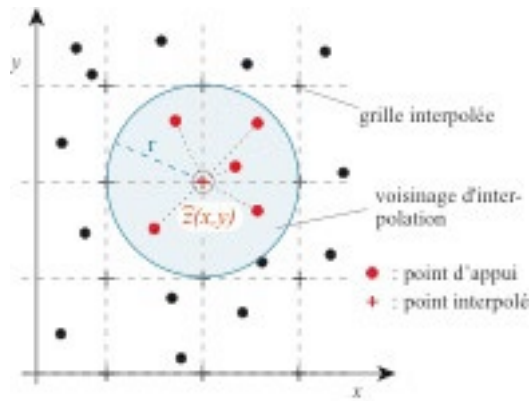


Fig. 4.5 Principe de l'interpolation par moyenne mobile pondérée.

La valeur estimée est

$$\hat{z}(s_n) = \sum_{\alpha=1}^n \omega_{\alpha} z_{\alpha} \quad (4.2)$$

où $\alpha = 1, 2, \dots, k$ avec k = nombre de points d'appui retenus.

z_{α} : valeur de l'attribut au point de contrôle z_{α} .

$\hat{z}(s_n)$: valeur estimée aux coordonnées (x_n, y_n) .

ω_{α} : Poids accordé au point de contrôle z_{α} , par exemple proportionnel à $1/d$, $1/d^2$, $1/d^n$.

Plus la puissance est élevée, plus l'effet local est accentué.

Si une anisotropie manifeste apparaît dans la distribution spatiale du phénomène, l'opérateur introduit des poids en relation avec l'orientation.

De même, des variations brusques du phénomène (falaise en topographie) dans le champ d'étude, c'est-à-dire une discontinuité, peuvent introduire des erreurs grossières dans les interpolations. Dans ce cas, on subdivise le domaine D en sous-domaines de manière à rendre chaque partie conforme aux exigences. Comme mentionné précédemment au paragraphe 4.2.4, si le domaine des points de mesure ne s'étend pas au-delà du champ d'étude à interpoler, alors des erreurs grossières d'estimation seront présentes aux limites de ce champ. On parle d'*effet de bordure* résultant d'une procédure d'extrapolation plutôt que d'interpolation souhaitée. Ces erreurs sont corrigées soit manuellement, soit par l'introduction de seuils, soit en réduisant les limites du domaine de sorte à conserver des points d'appui dans toutes les directions.

Requêtes spatiales

L'objectif de ce chapitre consacré aux requêtes spatiales est de démontrer le potentiel d'interrogations qu'offre la base de données géographique et son application à l'analyse spatiale.

Les systèmes d'information géographique font appel aux concepts de structuration et de normalisation de l'information. Ces derniers permettent de garantir la qualité et la faisabilité de l'interrogation. De plus, la rigueur appliquée à la saisie de l'information géométrique est primordiale pour la mise en œuvre de requêtes spatiales. Un langage d'interrogation dénommé SQL (*Structured Query Language*) a été élaboré originellement pour exploiter les bases de données relationnelles. Les producteurs de logiciel SIG se sont associés pour former l'*Open Geospatial Consortium* (OGC) afin de concevoir un SQL spatial incluant les interrogations géométriques et topologiques, dénommé GQL (*Geographic Query Language*). La normalisation n'est pas définitive dans la mesure où le développement très dynamique des logiciels propose de nouvelles fonctions avant de recevoir l'agrément des producteurs. On dispose aujourd'hui, néanmoins, d'une liste très étendue de fonctions que l'on peut considérer comme normalisées.

Les requêtes spatiales sont présentées successivement selon les trois dimensions : thématique, géométrique et topologique.

5 Requêtes spatiales

5.1 Requête et nature de la base de données géographique

La notion de requêtes spatiales recouvre les formes d'*interrogation* de la *base de données géographiques* (BDG) pour *sélectionner* et *localiser* l'information répondant à un ou plusieurs critères ou encore pour *exploiter* les informations par des calculs et par des règles de gestion.

Notons d'emblée que le mode adopté, *objet ou image*, a une influence sur les possibilités d'interrogation et d'analyse de l'information spatiale. L'approche objet, du fait de son association à une base de données constituée de tables relationnelles et de son contenu géométrique, offre une variété plus riche d'interrogations de l'information dans sa dimension topologique notamment. Ce chapitre concerne donc principalement le mode objet.

Il y a plusieurs manières de consulter et de combiner les informations contenues dans la BDG à des fins d'analyse, par exemple, le simple affichage du contenu d'une table ou d'une couche thématique. Ces approches rencontrent très vite des limites surtout si les informations que l'on souhaite extraire exigent un tri selon plusieurs critères ou la mise en œuvre d'un algorithme comportant la combinaison de plusieurs variables. La syntaxe et les fonctions associées aux requêtes spatiales développées pour l'exploitation d'une BDG suppléent à ces limites.

Une requête spatiale repose sur trois composantes :

- la *nature* et la *structure de l'information* d'entrée contenue dans la base de données,
- l'*objet* de la requête spatiale,
- la *formulation* et la *structuration* de la requête.

L'*interrogation* d'une base de données relationnelle repose sur un langage et un formalisme d'écriture des requêtes. Le langage communément utilisé est le *Structured Query Language (SQL)*, en français *Langage de recherche structuré*. Sa normalisation sous la forme d'une norme ISO a été établie à la fin de la décennie 1980. La dimension spatiale des SIG a exigé d'étendre ce langage, mais sa normalisation n'a pu être établie rapidement compte tenu de l'évolution très rapide des logiciels. La nécessité d'arriver tout de même à un standard pour l'ensemble des fonctions d'interopérabilité des logiciels SIG a poussé les constructeurs à se réunir en un consortium connu sous son appellation anglaise, l'*Open Geospatial Consortium (OGC)*. L'extension du SQL et sa normalisation en SQL spatial (souvent dénommé GQL pour *Geographic Query Language*), ont donné lieu à plusieurs normes ISO. Les principaux éléments de la normalisation du SQL spatial figurent dans un document publié en 2005 par l'OGC.

La standardisation n'est pas totalement respectée par les fournisseurs de logiciels car de nouvelles fonctions sont offertes avec l'évolution toujours dynamique des logiciels SIG.

Ce chapitre présente les principes des requêtes en SQL et leur structure. La catégorisation proposée est conforme au SQL spatial en abordant successivement les requêtes *thématiques*, *géométriques* et *topologiques*.

Les exemples de requêtes présentés dans cette partie ont été réalisés sur le logiciel Manifold (<https://manifold.net/>) qui offre des outils d'interrogation en SQL d'excellent niveau. La base de données exploitée est issue d'un travail d'étudiant portant sur une zone géographique située en Inde. Son *modèle conceptuel des données* (MCD) partiel, mais suffisant pour interpréter les exemples d'interrogations, est représenté sur la figure 5.1.

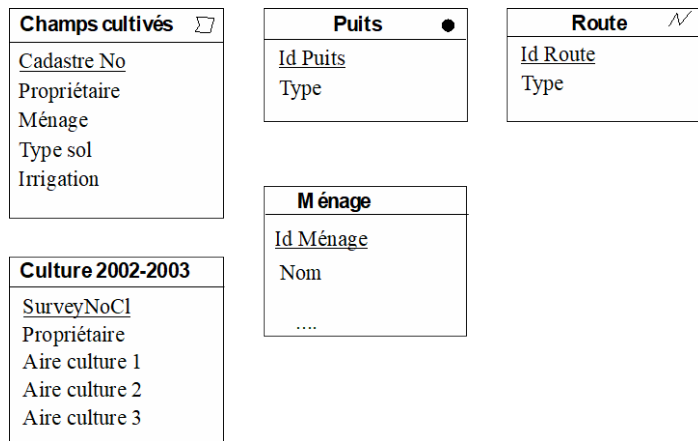


Fig. 5.1 MCD partiel de la zone d'étude du Gujarat (Inde).

5.2 Principes, catégories et exigences des interrogations

Bien que basée sur un principe relativement simple du « *Select ...from ... where ...* », c'est-à-dire *sélectionne* l'attribut de l'objet spatial qui remplit la *condition* formulée, la requête spatiale doit satisfaire à plusieurs propriétés décrites dans les sections suivantes.

5.2.1 Principe de la requête SQL

Une requête SQL repose sur le principe de *Question - Réponse*. L'interrogation de l'information spatiale est initiée par la création et la soumission d'une requête au système. Celui-ci renvoie la réponse après avoir contrôlé son intégrité. Cette démarche simple permet l'accès à un nombre considérable d'interrogations et d'analyses spatiales.

La diversité et le nombre de requêtes possibles rendent nécessaire leur classification selon les informations qu'elles exploitent. Leur typologie se résume en trois classes présentées dans la section suivante.

5.2.2 Typologie des requêtes

En référence aux dimensions d'une BDG, les requêtes sont classées en trois types.

- Les requêtes *thématiques* portent sur la sélection ou la manipulation d'objets spatiaux sur la base de leurs attributs (ex. sélection des champs composés de sols dits « noirs »).
- Les requêtes *géométriques* portent sur la sélection ou la manipulation d'objets spatiaux sur la base de leurs caractéristiques géométriques. (ex. sélection des champs d'une surface supérieure à 4 hectares).
- Les requêtes *topologiques* portent sur la sélection ou la manipulation des objets spatiaux sur la base de leurs caractéristiques de voisinage et de relations spatiales aux autres objets (ex. sélection des champs contenant un puits).

Les différents types de requêtes peuvent être combinés au sein d'une seule plus complexe (exemple : sélection des champs contenant un puits et d'une surface supérieure à 4 hectares). La requête est *spatiale* car elle combine les composantes thématique et géométrique de l'information (fig. 5.2).

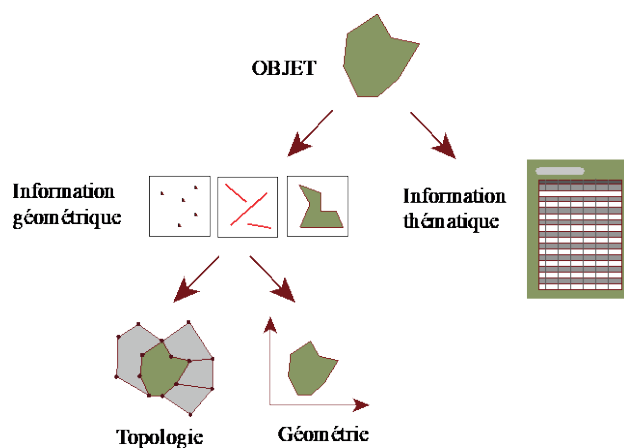


Fig. 5.2 Dimensions de l'information spatiale: thématique, géométrique et topologique.

5.2.3 Niveaux de complexité d'une requête

Les requêtes sont caractérisées, d'une part, selon leur *niveau d'imbrication* (simple / complexe) et, d'autre part, selon leur *objectif* (sélection / manipulation).

La *requête simple* fait appel à une interrogation unique pour une réponse unique. La *requête complexe* regroupe au sein d'une même requête une série de sous-requêtes permettant d'obtenir une réponse finale unique.

En référence à l'objectif, une première catégorie de requêtes concerne la *sélection et la localisation* d'objets spatiaux répondant aux critères d'interrogation. Une deuxième correspond aux requêtes dont l'objectif est de *créer un nouveau jeu de variables* par analyse des données, de gérer ou de manipuler un jeu existant (par exemple, par élimination d'objets ou, au contraire, par création de nouveaux objets) sur la base de critères d'interrogation. La figure 5.3 illustre ces deux catégories de requêtes.

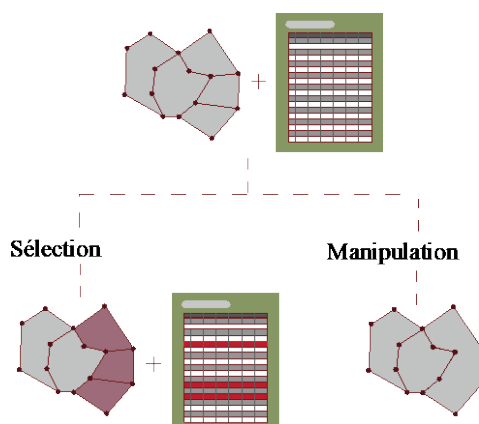


Fig. 5.3 Requêtes de sélection et de manipulation.

Les *trois types de requêtes* font l'objet d'une présentation détaillée dans la suite de ce chapitre. Il convient encore de préciser dans quelles conditions les requêtes ont des chances d'apporter une réponse fiable. Quelques remarques sont apportées à ce sujet.

5.2.4 Nature des entrées et des sorties

Les caractéristiques spatiales des données d'entrée influencent la faisabilité de leur intégration au sein d'une requête complexe. L'*échelle* ou la *résolution*, ainsi que la *géoréférence* sont des éléments clés

de l'intégrité des informations spatiales. Sans l'observation de règles très strictes de cohérence, les couches d'information ne pourront pas être combinées.

La *qualité de saisie* de l'information spatiale conditionne l'efficacité de la requête, notamment pour les interrogations portant sur la topologie. Des objets partageant une limite commune sont susceptibles d'être considérés non adjacents en raison d'une mauvaise saisie de leur contour. Une faute d'orthographe dans la saisie ou la non-normalisation d'un attribut peut écarter un objet du résultat de la requête malgré le fait qu'il réponde aux critères.

Les *résultats de la requête*, ou données de sortie, peuvent se présenter sous plusieurs formes :

- table et carte de sélection dynamique (fig. 5.4),
- transfert de données d'une table à l'autre,
- agrégation ou élimination de données ou d'objets,
- table et carte statique, rapport.

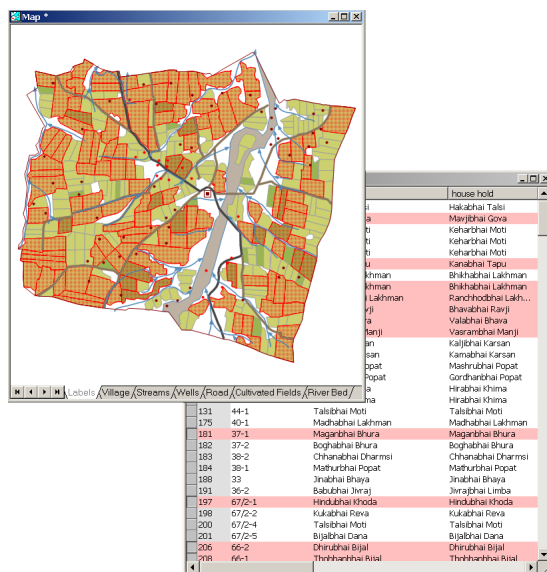


Fig. 5.4 Table et carte résultat d'une requête (sélection en rouge).

Dans le cas d'une requête de manipulation, des règles de transformation et de passage sont définies afin de garantir un résultat conforme aux données initiales et à l'objet de la requête.

5.2.5 Modes de création de requêtes

Plusieurs modes de création de requêtes sont proposés dans les logiciels de SIG courants. Selon le degré d'assistance offert par le logiciel et de connaissances requises de l'utilisateur, les modes de création d'une requête se classent en trois niveaux. Ils apparaissent sous forme d'une *interface graphique*.

- L'interface d'aide à la *mise en œuvre* permet à l'utilisateur de sélectionner les informations et les opérateurs de requêtes sans se soucier du langage et de la syntaxe de la requête.
- L'interface d'aide à la *rédaction* de requêtes présente l'ensemble des opérateurs de requête et les informations d'entrée. L'utilisateur peut donc composer le corps de la requête sans souci d'orthographe de celle-ci. Il reste cependant le garant de la syntaxe de la requête.
- L'interface de *composition* de la requête permet à l'utilisateur de composer, sans aide, le corps de la requête. Il doit, cependant, connaître à la fois les opérateurs et leur syntaxe ainsi que les couches d'entrée à disposition.

La figure 5.5 présente les trois modes de création de requêtes le plus fréquemment disponibles dans les logiciels SIG actuels (ici celui de Manifold).

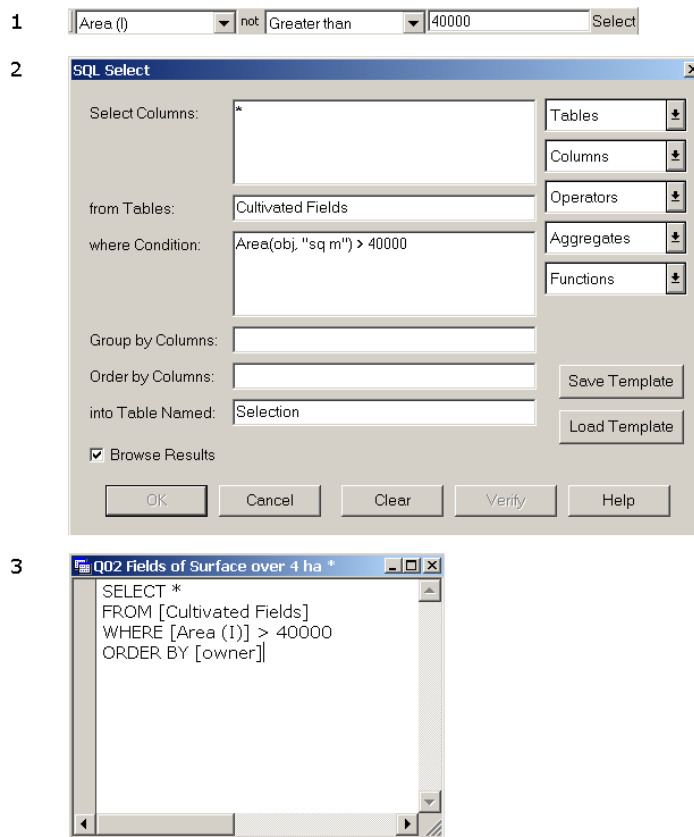


Fig. 5.5 Interfaces graphique de création de requêtes. (1) aide à la mise en œuvre, (2) aide à la rédaction, (3) ligne de commande (composition de la requête).

Le contexte et les principes de la requête spatiale étant décrits, il est temps maintenant de décrire les outils de requêtes eux-mêmes. Ceux-ci sont groupés en trois types selon qu'ils s'adressent respectivement aux propriétés *thématiques*, *géométriques* ou *topologiques* des objets. La dimension spatiale est traitée en combinant les critères thématiques d'une part, géométriques et topologiques d'autre part.

5.3 Requêtes thématiques

La requête *thématique* porte sur la *sélection* ou la *manipulation* d'informations spatiales basées sur les valeurs d'attributs des objets. Notons que la dimension spatiale, dans ce cas, ne réside pas dans la dimension de l'information interrogée, mais dans la localisation définie par l'objet auquel l'information est associée.

Le formalisme général d'une requête en SQL, comme formulé précédemment, est le suivant :

SELECT ... FROM ... WHERE ...

SELECT (les *objets* ou leurs *champs* à sélectionner) FROM (les *couches* ou *tables* auxquelles ils appartiennent) WHERE (les *critères* ou *conditions* à observer). Cette formulation correspond à l'utilisation des éléments de base du langage SQL.

Le tableau 5.1 présente de manière synthétique les opérateurs thématiques et leur fonction.

Tableau 5.1 Éléments de composition du langage SQL.

NOM	DESCRIPTION	EXEMPLE
ALTER	permet de modifier la structure d'une table une fois celle-ci créée	ALTER TABLE [Champs cultivés] ADD COLUMN [Propriétaire] TEXT(25)
CREATE	permet de créer une nouvelle table	CREATE TABLE [Champs cultivés] ([Propriétaire] TEXT, [Type culture] TEXT)
DELETE	efface les objets des tables définies par la clause FROM et répondant aux critères de la clause WHERE	DELETE * FROM [Champs cultivés] WHERE [Propriétaire] = "Dupont Jean"
DROP	efface une table	DROP TABLE [Champs cultivés]
FROM	définit les tables sur lesquelles va porter la requête	SELECT * FROM [Champs cultivés] WHERE [Type culture] = "Coton"
GROUP	groupe les éléments résultant d'une requête en fonction d'un attribut	SELECT *, Count(ID) AS [No champ] FROM [Champs cultivés] WHERE [Type culture] = "Coton" GROUP BY [Propriétaire]
INSERT	ajoute un ou plusieurs objets dans une table	INSERT INTO [Champs cultivés] ([Propriétaire],[Type culture]) VALUES ("Dupont Jean", "Coton")
JOIN	joint deux tables en fonction de la valeur d'un attribut commun	SELECT * FROM [Champs cultivés], [Famille] INNER JOIN [Champs cultivés].Propriétaire ON [Famille].Propriétaire WHERE [Famille].Class < 2
ORDER	trie le résultat d'une requête par ordre ascendant ou descendant d'un attribut	SELECT * FROM [Champs cultivés] WHERE [Type culture] = "Coton" ORDER BY [Propriétaire]
SELECT	sélectionne les objets ou champs mentionnés par rapport aux critères définis	SELECT * FROM [Champs cultivés] WHERE [Type culture] = "Coton"
TRANSFORM	crée un tableau à double entrée	TRANSFORM Count(ID) SELECT [Propriétaire] FROM [Champs cultivés] GROUP BY [Propriétaire] ORDER BY [Propriétaire] PIVOT [Type culture]
UNION	combine les résultats de requêtes distinctes	SELECT [Propriétaire] FROM [Champs cultivés] WHERE [Type culture] = "Coton" UNION SELECT [Propriétaire] FROM [Famille] WHERE [Class] > 2
UPDATE	Met à jour le nombre de champs par calcul ou substitution sur la base d'un critère	UPDATE [Champs cultivés] SET [Propriétaire] = "Dupont Jean" WHERE [Propriétaire] = "Talsibhai Moti"
WHERE	spécifie les critères qui décideront de la sélection des éléments	SELECT * FROM [Champs cultivés] WHERE [Type culture] = "Coton"

L'exemple suivant présente la mise en œuvre d'une requête de manipulation utilisant les éléments TRANSFORM et JOIN pour établir le tableau à double entrée correspondant au nombre de champs en fonction de leur type de culture et de leur type de sol (tab. 3.2).

TRANSFORM Count(ID) **SELECT** [Champs cultivés].[soil] **FROM** [Champs cultivés], [Culture 2002-2003] **INNER JOIN** [Culture 2002-2003] **ON** [Champs cultivés].[Cadastre No] = [Culture 2002-2003].[Cadastre No] **GROUP BY** [Champs cultivés].[soil] **ORDER BY** [Champs cultivés].[soil] **PIVOT** [Culture 2002-2003].[Type culture]

Tableau 5.2 Nombre de champs selon les caractéristiques de sol et les cultures pratiquées.

sol	Coton	Jachère	Arachide	Millet	Sésame	Sorgho
Noir	6	3	9	2	6	
Noir, rouge		1	2			
Rouge	36	20	124	12	39	8
Rouge, noir		1	1	1	1	
Rouge, salin					1	
Rouge, sableux			2			
Salin	1					
Salin, rouge	1				1	
Sableux	6	3	9	2		2
Sableux, noir			1			

La réponse aux critères de requête et les champs résultants sont calculés grâce à la mise en œuvre d'opérateurs d'interrogation. On distingue quatre types d'opérateurs :

- les opérateurs de *comparaison*, permettant de mettre en relation des valeurs de champs et des critères de sélection ;
- les opérateurs *arithmétiques*, permettant de procéder à des calculs sur la base des valeurs de champ ;
- les opérateurs *logiques*, grâce auxquels il est possible de combiner des critères entre eux ;
- les opérateurs *statistiques*, permettant d'agréger l'information sous la forme d'indices statistiques.

5.3.1 Opérateurs de comparaison

Les opérateurs de *comparaison* confrontent la valeur d'attribut d'un objet à un critère de sélection. Cette comparaison peut être mise en œuvre pour les variables cardinales, ordinales et nominales. Le tableau 3.3 reprend les principaux opérateurs de comparaison et définit leur applicabilité, signalée par un ●, en fonction de l'échelle de mesure.

Tableau 5.3 Opérateurs de comparaisons.

OPERATEUR	DESCRIPTION	CARDINAL	ORDINAL	NOMINAL
=	Opérateur d'égalité	●	●	●
<	Opérateur d'infériorité	●	●	
>	Opérateur de supériorité	●	●	
<=	Opérateur d'infériorité et de supériorité	●	●	
>=	Opérateur de supériorité et d'égalité	●	●	
<>	Opérateur d'inégalité	●	●	●

La comparaison est directe, elle peut porter sur la valeur brute d'un attribut, ou indirecte, ou encore porter sur un calcul arithmétique ou statistique (voir les sections suivantes) faisant intervenir plusieurs attributs.

5.3.2 Opérateurs arithmétiques

Les opérateurs *arithmétiques* s'appliquent en règle générale aux *attributs de valeurs cardinales*. Toutefois, l'informatique autorise une utilisation de tels opérateurs pour des attributs de type ordinal et nominal, l'analyste doit donc rester vigilant à ce propos.

L'exemple suivant présente la mise en œuvre d'opérateurs arithmétiques pour le calcul d'un indicateur de salinité des puits à partir des mesures de conductivité électrique de l'eau.

```
SELECT [Puits ID], (TDS / 1000 + 1) AS [Salinité] FROM [Puits Table]
```

Le tableau 5.4 donne la liste des opérateurs arithmétiques. Leur applicabilité selon l'échelle de mesure est marquée par un ●.

Tableau 5.4 Opérateurs arithmétiques.

OPERATEUR	DESCRIPTION	CARDINAL	ORDINAL	NOMINAL
+	Opérateur d'addition	●		● (1)
-	Opérateur de soustraction	●		
*	Opérateur de multiplication	●		● (1)
/	Opérateur de division	●		
^	Opérateur exponentiel	●		
MOD	Opérateur modulo	●		

La séquence des opérateurs arithmétiques utilisés conjointement suit les règles traditionnelles. La hiérarchie de mise en œuvre des opérateurs ^ puis * et / puis + et - est observée.

(1) Les opérateurs d'addition ou de multiplication en échelle nominale ne peuvent être exploités que dans des cas particuliers. Un exemple pour des attributs nominaux est la *concaténation* qui correspond à un collage d'une série de textes. Cette opération est utilisée notamment pour créer le nom d'un nouveau champ comme par exemple la dénomination d'un fichier image composé du nom de l'objet et de l'extension définissant son format.

[Nom Objet] + [extension] "Objet1" + ".jpg" -> "Objet1.jpg"

Quant à l'opérateur de multiplication, il est utilisé pour réaliser des opérations booléennes comme l'établissement de « *masque* ».

5.3.3 Opérateurs logiques

Les opérateurs *logiques* permettent de combiner plusieurs conditions (*where*) au sein de la même requête. Ils sont utilisés dans le but de resserrer ou d'élargir les résultats d'une requête. La requête porte donc sur l'observation simultanée de plusieurs critères. Ils donnent lieu à la *table de vérité* représentée par le tableau 3.5.

Un exemple est la localisation des champs avec une double condition à satisfaire : les sols dits « noir » et sur lesquels est cultivé le coton. La requête devient

```
SELECT * FROM [Champs cultivés] WHERE [Soil] = "Noir" AND [Type culture] = "Coton"
```

Un second exemple est la localisation des champs dont le sol est noir *ou* sur lesquels est cultivé le coton.

SELECT * FROM [Champs cultivés] WHERE [Soil] = "Noir" OR [Type culture] = "Coton"

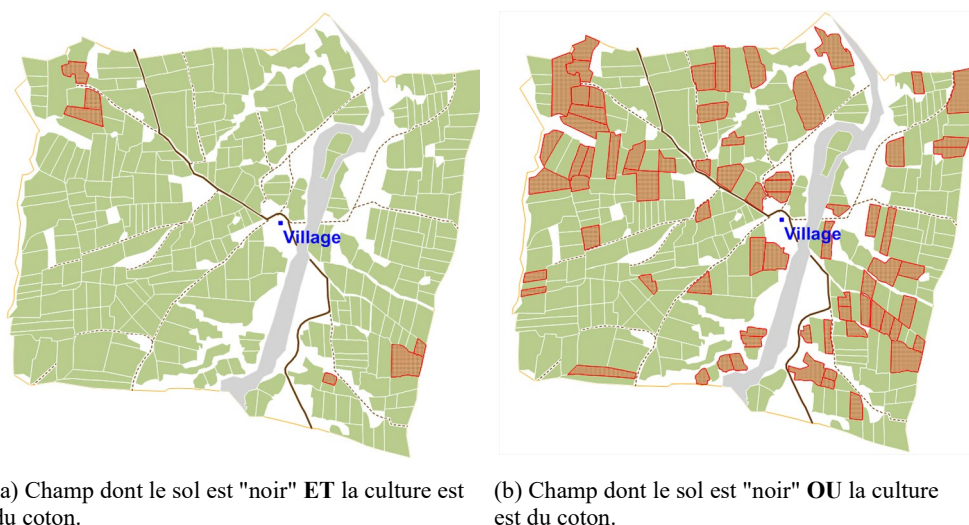


Fig. 5.6 Résultats de l'utilisation des opérateurs logiques : (a) AND/ET et (b) OR/OU.

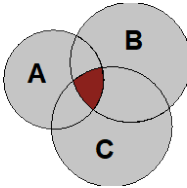
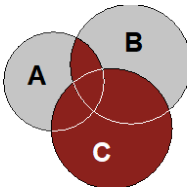
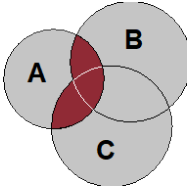
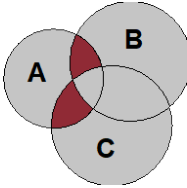
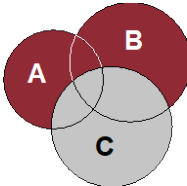
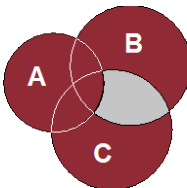
Les principaux opérateurs logiques sont les suivants (tab. 5.5). Les diagrammes de Venn associés illustrent les résultats de chacune des opérations.

Tableau 5.5 Opérateurs logiques.

OPERATEUR	DESCRIPTION	EXEMPLE	DIAGRAMME
AND	Opérateur logique "et"	A AND B	
OR	Opérateur logique "ou", appelé également "ou inclusif"	A OR B	
NOT	Opérateur logique "et non"	A NOT B	
XOR	Opérateur logique "ou et uniquement ou", appelé également "ou exclusif"	A XOR B	

La combinaison d'opérateurs logiques permet d'obtenir des réponses nuancées. Le tableau (tab. 5.6) présente quelques exemples de combinaison et leur résultat dans un diagramme de Venn.

Tableau 5.6 Exemples de combinaison d'opérateurs logiques.

COMBINAISON	DIAGRAMME	EXEMPLE
A AND B AND C		sélectionner les champs irrigués de M. Dupont Jean affectés au coton SELECT * FROM [Champs cultivés] WHERE [Propriétaire] = "Dupont Jean" AND [Type culture] = "Coton" AND [Irrigation] = 1
(A AND B) OR C		sélectionner les champs de M. Dupont Jean affectés au coton ou les champs irrigués SELECT * FROM [Champs cultivés] WHERE ([Propriétaire] = "Dupont Jean" AND [Type culture] = "Coton") OR [Irrigation] = 1
A AND (B OR C)		sélectionner les champs de M. Dupont Jean affectés au coton ou irrigués SELECT * FROM [Champs cultivés] WHERE [Propriétaire] = "Dupont Jean" AND ([Type culture] = "Coton" OR [Irrigation] = 1)
A AND (B XOR C)		sélectionner les champs de M. Dupont Jean soit affectés au coton, soit irrigués, mais pas les deux SELECT * FROM [Champs cultivés] WHERE [Propriétaire] = "Dupont Jean" AND ([Type culture] = "Coton" XOR [Irrigation] = 1)
(A OR B) NOT C		sélectionner les champs irrigués de M. Dupont Jean qui ne sont pas affectés à la culture du coton SELECT * FROM [Champs cultivés] WHERE ([Propriétaire] = "Dupont Jean" OR [Irrigation] = 1) NOT ([Type culture] = "Coton")
A OR (B XOR C)		sélectionner les champs qui appartiennent à M. Dupont Jean ou qui sont soit irrigués, soit affectés au coton SELECT * FROM [Champs cultivés] WHERE [Propriétaire] = "Dupont Jean" OR ([Irrigation] = 1 XOR ([Type culture] = "Coton"))

5.3.4 Opérateurs statistiques

Les *opérateurs statistiques* ont pour but de calculer des indicateurs statistiques basés sur les valeurs des champs thématiques. Ils permettent de transformer l'information sous une forme agrégée, comme par exemple la tendance centrale ou la dispersion des valeurs d'attribut des objets. La liste des opérateurs statistiques, proposés par la grande majorité des logiciels SIG, est présentée dans le tableau 5.7.

Tableau 5.7 Opérateurs statistiques.

OPERATEUR	DESCRIPTION	CARDINAL	ORDINAL	NOMINAL
MAX	Valeur maximale rencontrée	•	•	
MIN	Valeur minimale rencontrée	•	•	
MEAN	Moyenne des valeurs	•		
STDDEV	Écart type associé à la moyenne	•		
VAR	Variance associée à la moyenne	•		
SUM	Somme des valeurs	•	•	
COUNT	Nombre d'objets décomptés	•	•	•

On peut regretter que ces logiciels se restreignent trop souvent à la seule échelle cardinale. Ils omettent les indicateurs de tendance centrale et de diversité des niveaux nominal et ordinal, tels que le mode, la diversité, la médiane, l'interquartile.

Étant donné la caractéristique agrégative de ce type d'opérateurs, leur mise en œuvre débouche en général sur des requêtes dites de manipulation.

5.4 Requêtes géométriques

La requête géométrique procède à la *sélection* ou à la *manipulation* d'objets sur la base de leurs caractéristiques géométriques (position, aire, longueur, périmètre). Le modèle spatial adopté prend ici toute son importance. En effet, la mesure de caractéristiques géométriques des éléments du territoire est fonction du mode spatial choisi (raster ou vecteur).

Les logiciels actuels présentent des approches différentes des caractéristiques géométriques des objets spatiaux. Outre la méthode de mesure des différentes variables géométriques pouvant varier d'un logiciel à l'autre, les caractéristiques géométriques sont calculées directement sur l'unité graphique géoréférencée. Ainsi, elles découlent de l'objet (attribut intrinsèque) ou devront faire l'objet du calcul spécifique (attribut calculé) suivant les logiciels.

5.4.1 Position

La position (x,y) dans le système de référence est déterminée par les coordonnées x et y de l'objet (pour le cas d'un système cartésien). Dans le cas du point, les coordonnées correspondent à celles du point lui-même. Dans le cas d'une ligne ou d'une zone, les coordonnées de l'objet correspondent à celles du centre de gravité de l'objet (centroïde). Suivant la géométrie de l'objet, il est possible que le centre de gravité se trouve à l'extérieur de celui-ci. En mode raster, les coordonnées correspondent à celles du centre de la cellule.

Un exemple de requête géométrique faisant appel à la position de l'objet consiste à déterminer l'ensemble des champs situés au nord du village, connaissant les coordonnées du village ($Y=2600$) (fig. 5.7).

```
SELECT * FROM [Champs cultivés] WHERE [Y] > 2600
```

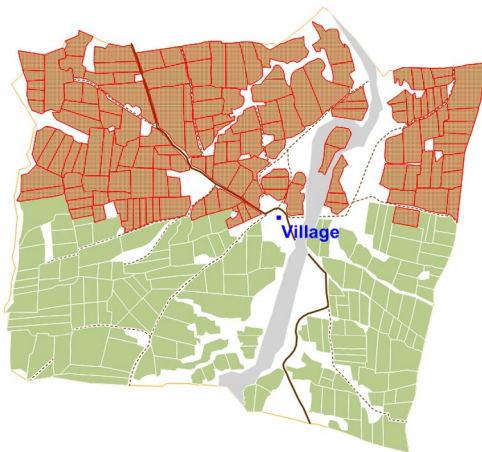


Fig. 5.7 Sélection de champ en fonction de leur position (nord du village).

5.4.2 Longueur et aire

La longueur et l'aire correspondent à la mesure de la dimension des objets linéaires et zonaux.

Un exemple de requête faisant appel à une condition de longueur est de localiser les tronçons routiers d'une longueur inférieure à 2 km (fig. 5.8a).

```
SELECT * FROM [Route] WHERE [Longueur] < 2000
```

Un autre exemple, surfacique cette fois-ci, est de localiser les champs d'une surface supérieure à 4 hectares (fig. 5.8b).

```
SELECT * FROM [Champs cultivés] WHERE [Aire] > 40000
```



(a)



(b)

Fig. 5.8 (a) Sélection des routes d'une longueur inférieure à 2 km et (b) sélection des champs d'une aire supérieure à 4 ha.

5.4.3 Distance

La distance généralement considérée est la distance linéaire (euclidienne) entre les centres des objets. Il s'agit donc d'une analyse des relations de voisinage entre les objets. D'autres types de distances peuvent néanmoins être considérés comme la distance Manhattan et la proximité pondérée propres au mode raster.

Un exemple de requête faisant appel à la distance linéaire est la localisation des champs situés à moins de 400 m des routes principales. Le résultat d'une telle requête est donné par la figure 5.9.

```
SELECT [Champs cultivés].* FROM [Route], [Champs cultivés] WHERE [Route].Type ="double" AND Distance ([Champs cultivés].ID,[Route].ID, "m") < 400
```

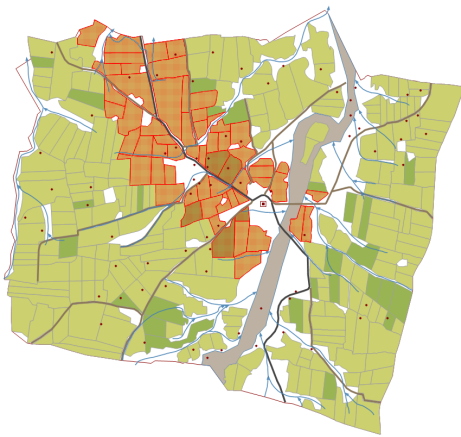


Fig. 5.9 Sélection des champs situés à moins de 400 m de la route principale.

5.5 Requêtes topologiques

La topologie considère l'objet dans son contexte et permet d'analyser les relations de voisinage entre objets sans métrique. Plusieurs cas de voisinage sont susceptibles d'être rencontrés dans l'espace géographique. Ils sont déterminés à partir des deux modèles représentés sur la figure 5.10.

La présentation suivante de la topologie rappelle les notions de base afin de définir le contexte dans lequel les opérateurs topologiques interviennent dans les requêtes spatiales.

5.5.1 Modèle topologique

La modélisation de la topologie la plus fréquemment utilisée a été proposée par Egenhofer. Son modèle considère les objets spatiaux selon trois éléments-clés: le *bord* identifié plus loin par l'indice *b*, le *corps intérieur*, indice *i* et la *matrice complémentaire* - ou *corps extérieur*, indice *e* (fig. 5.10). Le bord correspond aux limites de l'objet spatial, séparant le corps intérieur de la matrice complémentaire. Le corps intérieur représente le corps de l'objet spatial. La matrice complémentaire représente le complément de l'espace considéré excluant le bord et le corps intérieur. Un modèle *simplifié* ne considère que les *éléments de bord et de corps intérieur*.

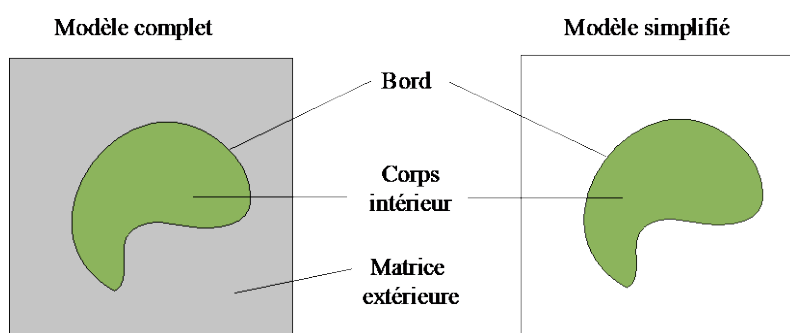


Fig. 5.10 Éléments des objets spatiaux.

Le tableau 3.8 présente la correspondance des notions de bords, corps intérieur et de matrice extérieure pour chacune des primitives géométriques, le point, la ligne et la zone. Le modèle complet comprend les trois éléments, le modèle simplifié ne tient pas compte de la matrice extérieure.

Tableau 5.8 Correspondance entre éléments de l'objet et les primitives géométriques pour un modèle simplifié.

ELEMENT	POINT	LIGNE	ZONE
BORD	point	points d'extrémités	Ligne de périmètre extérieure et intérieure
CORPS INTÉRIEUR	point	ligne	Aire intérieure

En tenant compte des trois repères considérés par Egenhofer, deux objets A et B sont susceptibles d'être en contact de 9 manières. Le tableau 6.9 en fait l'inventaire. Sans tenir compte de la matrice extérieure, qui correspond au modèle simplifié, le nombre de situations se réduit à 4. Elles apparaissent en grisé sur le tableau.

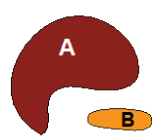
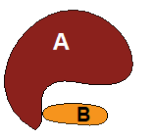
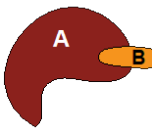
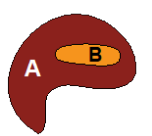
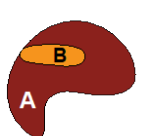
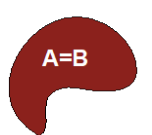
Tableau 5.9 Neuf situations de contact topologique entre deux objets dont quatre pour le modèle simplifié.

$A_b \cap B_b$	$A_b \cap B_i$	$A_b \cap B_e$
$A_i \cap B_b$	$A_i \cap B_i$	$A_i \cap B_e$
$A_e \cap B_b$	$A_e \cap B_i$	$A_e \cap B_e$

5.5.2 Opérateurs topologiques

Les opérateurs topologiques qui en découlent sont résumés dans le tableau 6.10. Il est possible que seuls certains d'entre eux soient réellement mis à disposition dans les logiciels actuels.

Tableau 5.10 Opérateurs arithmétiques.

OPERATEURS	DESCRIPTION	DIAGRAMME	MATRICE DE CONTIGUÏTÉ																							
DISJOINT	Deux objets sont dits disjoints si ni leur bord, ni leur corps intérieur ne se touchent		<table><tr><td colspan="2"></td><td colspan="3">B</td></tr><tr><td colspan="2"></td><td>b</td><td>i</td><td>e</td></tr><tr><td rowspan="3">A</td><td>b</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>i</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>e</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>			B					b	i	e	A	b	0	0	1	i	0	0	1	e	1	1	1
		B																								
		b	i	e																						
A	b	0	0	1																						
	i	0	0	1																						
	e	1	1	1																						
ADJACENT	Deux objets sont dits adjacents si uniquement leurs bords se touchent		<table><tr><td colspan="2"></td><td colspan="3">B</td></tr><tr><td colspan="2"></td><td>b</td><td>i</td><td>e</td></tr><tr><td rowspan="3">A</td><td>b</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>i</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>e</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>			B					b	i	e	A	b	1	0	1	i	0	0	1	e	1	1	1
		B																								
		b	i	e																						
A	b	1	0	1																						
	i	0	0	1																						
	e	1	1	1																						
INTERSECT	Deux objets présentent une intersection si il y a une zone d'intersection non nulle entre leurs corps intérieurs		<table><tr><td colspan="2"></td><td colspan="3">B</td></tr><tr><td colspan="2"></td><td>b</td><td>i</td><td>e</td></tr><tr><td rowspan="3">A</td><td>b</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>i</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>e</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>			B					b	i	e	A	b	1	1	1	i	1	1	1	e	1	1	1
		B																								
		b	i	e																						
A	b	1	1	1																						
	i	1	1	1																						
	e	1	1	1																						
CONTENANT (CONTENU)	Un objet en contient un autre si son corps intérieur enveloppe entièrement le bord de l'objet contenu		<table><tr><td colspan="2"></td><td colspan="3">B</td></tr><tr><td colspan="2"></td><td>b</td><td>i</td><td>e</td></tr><tr><td rowspan="3">A</td><td>b</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>i</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>e</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr></table>			B					b	i	e	A	b	0	0	1	i	1	1	1	e	0	0	1
		B																								
		b	i	e																						
A	b	0	0	1																						
	i	1	1	1																						
	e	0	0	1																						
COUVRANT (COUVERT)	Un objet couvre un autre si son corps intérieur est enveloppé par le corps intérieur de l'objet couvert		<table><tr><td colspan="2"></td><td colspan="3">B</td></tr><tr><td colspan="2"></td><td>b</td><td>i</td><td>e</td></tr><tr><td rowspan="3">A</td><td>b</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>i</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>e</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr></table>			B					b	i	e	A	b	1	0	1	i	1	1	1	e	0	0	1
		B																								
		b	i	e																						
A	b	1	0	1																						
	i	1	1	1																						
	e	0	0	1																						
EQUAL (EGAL)	Deux objets sont dits égaux si leurs bords et leurs corps intérieurs sont identiques		<table><tr><td colspan="2"></td><td colspan="3">B</td></tr><tr><td colspan="2"></td><td>b</td><td>i</td><td>e</td></tr><tr><td rowspan="3">A</td><td>b</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>i</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>e</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr></table>			B					b	i	e	A	b	1	0	0	i	0	1	0	e	0	0	1
		B																								
		b	i	e																						
A	b	1	0	0																						
	i	0	1	0																						
	e	0	0	1																						

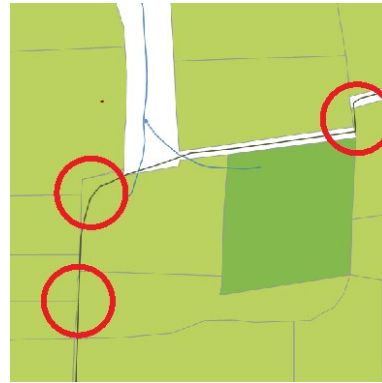
L'exemple suivant présente une requête portant sur l'opérateur topologique d'adjacence. Le but de la requête est de localiser l'ensemble des champs adjacents aux routes.

```
SELECT [Champs cultivés].* FROM [Champs cultivés][Route] WHERE Adjacent([Champs cultivés].ID, [Route].ID)
```

La figure 5.11(a) présente le résultat obtenu. Seul un champ répond au critère d'interrogation alors que visuellement plusieurs champs devraient être sélectionnés. Ce résultat trop restreint est dû à la saisie peu rigoureuse de la géométrie, comme le révèle un zoom sur les lignes de contour des objets (fig. 5.11(b)).



(a) Résultat de la requête d'adjacence



(b) Influence de la qualité de la numérisation géométrique sur le résultat de la requête

Fig. 5.11 (a) Sélection des champs situés en bordure de route par la méthode de l'adjacence ; (b) défaut de numérisation.

L'exemple suivant a pour but de dépasser le problème dû à la saisie en utilisant non plus un opérateur d'adjacence mais d'intersection (coupant).

```
SELECT [Champs cultivés].* FROM [Champs cultivés][Route] WHERE intersect (Touches) ([Champs cultivés].ID, [Route].ID)
```

Cette modification de la requête améliore le résultat de sélection, mais celui-ci reste éloigné de la réalité (fig. 5.12).

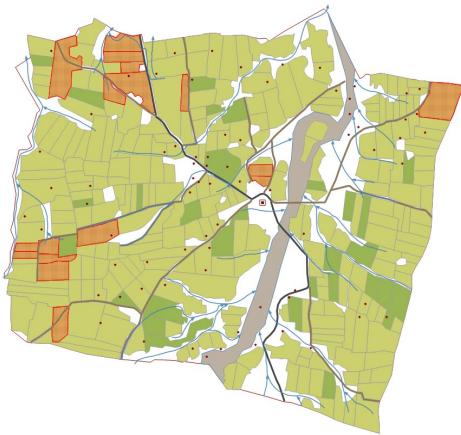


Fig. 5.12 Sélection des champs situés en bordure de route par la méthode de l'intersection.

Un exemple supplémentaire tente à nouveau de se rapprocher du but recherché en utilisant un opérateur de distance à la route (50 m) (fig. 3.13).

```
SELECT [Champs cultivés].* FROM [Route][Champs cultivés] WHERE Distance ([Champs cultivés].ID,[Route].ID, "m") < 50
```



Fig. 5.13 Sélection des champs situés en bordure de route par la méthode de la distance.

Cet exemple démontre les limites des requêtes topologiques ou géométriques face à la qualité des données spatiales. Une acquisition rigoureuse de la géométrie des données spatiales prend tout son sens ici.

Conclusion

Les requêtes spatiales formulées en SQL recouvrent un large éventail d'informations que l'on est susceptible d'extraire d'une BDG. Leur avantage réside dans le fait que les opérateurs font partie des logiciels SIG courants.

Les logiciels SIG actuels sont également ouverts à des langages de programmation permettant de réaliser des modules adaptés aux applications demandées par l'utilisateur. Cette capacité étend le potentiel offert par le SQL et ouvre la voie à la création d'applications spécialisées. Il est possible de coupler la base de données géographique (BDG) à un logiciel de simulation, par exemple hydrologique. Nombreux développements de producteurs de logiciels vont dans ce sens par la mise à disposition de modules complémentaires propres à des domaines d'application tels que la gestion du trafic routier, la production agricole, le cadastre foncier.

6

Coder en Python pour la manipulation de données géospatiales

La manipulation de données géospatiales est une composante essentielle de nombreuses applications liées à la cartographie, à la géographie et à l'analyse spatiale. Python est un langage de programmation polyvalent et largement utilisé qui offre une gamme d'outils puissants pour travailler avec des données géospatiales. Cette partie du cours présente de façon succincte comment manipuler des données géospatiales en utilisant Python, et met en lumière les fonctionnalités disponibles dans la console Python du logiciel QGIS.

6 Manipulation de données géospatiales avec Python

Il existe plusieurs environnements de programmation Python spécifiquement adaptés à la géoinformatique, chacun offrant ses propres fonctionnalités et avantages.

Jupyter Notebook est un environnement de développement interactif populaire qui prend en charge plusieurs langages de programmation, dont Python. Il est largement utilisé dans le domaine de la géoinformatique pour créer des documents interactifs intégrant du code Python, des visualisations et des explications textuelles.

Spyder est un environnement de développement intégré (IDE) spécialement conçu pour la programmation scientifique en Python. Il offre des fonctionnalités avancées telles que la complétion automatique, l'exploration de variables, le débogage et l'intégration avec des bibliothèques populaires de géoinformatique comme *geopandas*, *matplotlib* et *numpy*.

PyCharm est un autre IDE populaire pour le développement Python qui offre un large éventail de fonctionnalités, y compris la gestion de projets, le débogage, la complétion automatique, la refactorisation de code et l'intégration avec des outils de versioning.

Visual Studio Code est un éditeur de code léger et puissant qui prend en charge le développement Python et offre des extensions spécifiques. Il est personnalisable et dispose d'une large gamme d'extensions.

Finalement, les logiciels de SIG intègrent directement des outils Python. C'est le cas de QGIS, un SIG open source, qui intègre un environnement de programmation Python. Et dans le domaine commercial, il faut noter qu'*ArcGIS Pro* développé par ESRI permet une bonne intégration avec Python.

Ces environnements de programmation Python sont utilisés pour développer des applications, automatiser des tâches, effectuer des analyses spatiales et visualiser des données géospatiales. Chaque environnement offre ses propres fonctionnalités et avantages, et le choix dépend souvent des préférences personnelles de l'utilisateur ainsi que des besoins spécifiques du projet.

Ce cours décrit l'utilisation de Python dans la console du logiciel QGIS.

6.1 Les bases de Python pour une utilisation avec les SIG

6.1.1 Les types natifs (nombres, booléens, chaînes de caractères, types séquentiels)

Les nombres (entiers ou flottants)

▪ Entiers (int) :

```
-5
1
250
135843125498711354154815
1000000
1_000_000
```

▪ Flottants (float) :

```
-5.485
1.254
150.87
10.0
```

Les booléens

- 1 : True ou 0 : False
- True + 5 = 6 , False + 5 = 5
- Les objets vides ou nul tels que : « », 0, 0.0, [], {} donnent la valeur False

Les chaînes de caractères

"Je suis une chaîne de caractère"

Le guillemet simple reconnu
comme une fin de caractère

```
print('on m'appelle l'OVNI')
print('on m'appelle l'OVNI')
SyntaxError: invalid syntax. Perhaps you forgot a comma
```

- Délimité par des guillemets simples ou doubles → Préférer des guillemets doubles :

```
print('On m'appelle l'OVNI')
print("On m'appelle l'OVNI")
```

→ On m'appelle l'OVNI
On m'appelle l'OVNI

- Une chaîne de caractères peut être multiligne et sera affichée sur plusieurs lignes avec la commande print()

```
string = '''Je suis
une chaîne de caractère
sur 3 lignes'''
print(string)
```

Output :

```
Je suis
une chaîne de caractère
sur 3 lignes
```

- Des caractères spéciaux (\n, \t etc.) → pour ne pas les interpréter il faut ajouter r comme suit :

```
print('C:\Bureau\thierry\nouveau')
print(r'C:\Bureau\thierry\nouveau')
```

→ C:\Bureau\hierry
ouveau

→ C:\Bureau\thierry\nouveau

Les chaînes de caractères – fonctions usuelles

- replace()

```
blaze="Eminem"
print(blaze.replace("nem", "whinehouse"))
```

→ Emiwhinehouse

- strip() / rstrip() / lstrip()

right

left

```
text = " This is a test string. "
text = text.strip()
print(text)
```

Les espaces ont été enlevés
au début et à la fin

→ 'This is a test string'

- split() / join()

```
text = "This is a test string."
words = text.split()
print(words)
```

→ ['This', 'is', 'a', 'test', 'string']

```
words = ['This', 'is', 'a', 'test', 'string.']
text = '. '.join(words)
print(text)
```

→ This is a test string.

Le séparateur par défaut est l'espace mais n'importe quel caractère peut être utilisé comme séparateur

Les chaînes de caractère – fonctions usuelles (2)

- isdigit() → Tous les caractères sont des chiffres numériques ?

```
text = "12345"
result = text.isdigit()
print(result)
```

→ True

```
text = "12345abc"
result = text.isdigit()
print(result)
```

→ False

- isupper() → La chaîne de caractère ne contient que des majuscules ?

- istitle() → La chaîne de caractères commence par une majuscule ?

- islower() → La chaîne de caractères ne contient que des minuscules ?

Retourne
un booléen

- startswith() / endswith()

Ces deux fonctions sont "case sensitive" et différencient les majuscules des minuscules

```
text = "This is a test string."
result = text.startswith("This")
print(result)
```

→ True

```
text = "This is a test string."
result = text.startswith("is")
print(result)
```

→ False

Les constructeurs de types natifs

<code>str()</code>	Chaînes de caractères	<code>str("bonjour")</code>	"bonjour"
<code>int()</code>	Nombres entiers	<code>int(5)</code>	5
<code>float()</code>	Nombres décimaux	<code>float(10.7)</code>	10.7
<code>bool()</code>	Booléens	<code>bool(True)</code>	True

`str(5)` → "5"
`int("2")` → 2

`int("bonjour")`
→

ValueError: invalid literal for int() with base 10: 'bonjour'

 La conversion n'est possible que si le changement de type convient à l'objet

Les variables - Nomenclature

- Ne peuvent pas commencer par un chiffre
- Ne peuvent pas contenir d'espace
- Ne peuvent contenir que des caractères alphanumériques (A-z, 0-9) et ne peuvent pas contenir le tiret du haut (-), seulement le tiret du bas (_)
- Certains mots sont réservés (print, True, break, etc.)

75Paris	Paris75	paris_75
Site-Web	Site_Web	site_web
#lien video	lienVideo	lien_video
True	true	true

- Attention : `ma_variable` ≠ `Ma_variable` → Sensible à la casse

Les variables - Affectations

- Affectations simples : `a = 5`
`nom = objet`

- Affectations parallèles : `a, b = 5, 8`
`a, b, c, d, e, f = 1, 2, 3, 4, 5, 6`

- Affectations multiples : `a = b = c = 5`
~~`a = b = 5 = c`~~

Les variables – Concaténation 1

- On utilise le « + » pour concaténer deux chaînes de caractères
- On transforme une variable en chaîne de caractère avec la fonction `str()` si la variable le permet :

```
note_intermediaire_SIG = 5.25
note_examen_final_SIG = 5

print("J'ai eu la note de "+str(note_intermediaire_SIG)+" a l'examen intermediaire de SIG")
print("J'ai eu la note de "+str(note_examen_final_SIG)+" a l'examen final de SIG")

J'ai eu la note de 5.25 a l'examen intermediaire de SIG
J'ai eu la note de 5 a l'examen final de SIG

note_finale = note_intermediaire_SIG*0.4 + note_examen_final_SIG*0.6
print("Ma note finale est de "+str(note_finale))

Ma note finale est de 5.1
```

Les operations arithmétiques se font sur les variables de type int et float et non sur les caractères

Les variables – Concaténation 2

- f-string:

```
x = 10
y = 12
print(f"la multiplication de {x} par {y} donne {x*y}")

la multiplication de 10 par 12 donne 120
```

La méthode f-string est intéressante pour un remplissage rapide.
La méthode `format()` est intéressante pour automatiser un remplissage

- Méthode `format`:

```
protocole = "https://"
nom_du_site = "mon_site_web"
extension = "ch"
url = "{}www.{}.{}".format(protocole, nom_du_site, extension)
url = "{}www.{}.{}".format("https://", "mon_site_web", "ch")

https://www.mon_site_web.ch
```

```
note_intermediaire_SIG = 5.25
note_examen_final_SIG = 5

NOTE = "J'ai eu {note_interm} a l'examen intermediaire et {note_finale} a l'examen final"
notification_note = NOTE.format(note_interm=note_intermediaire_SIG, note_finale=note_examen_final_SIG)
print(notification_note)

J'ai eu 5.25 a l'examen intermediaire et 5 a l'examen final
```

6.1.2 Les opérateurs

Les opérateurs

- Opérateurs calculatoires basiques (+ * - /)

```
print("Eminem"+"50Cent")
Eminem50Cent
print("Drake"*3)
DrakeDrakeDrake
```

- + et * permettent aussi d'effectuer des opérations sur les chaînes de caractère

- Modulo (%) permet de récupérer le reste de la division entière de deux nombres

```
print(20 % 5)
0
print(20 % 3)
2
```

- Division entière (//) : permet de récupérer l'entier de la division

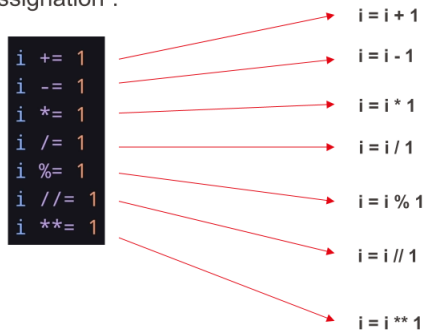
```
print(10 // 3)
3
```

- L'opérateur puissance (**)

```
print(2 ** 4)
16
```

Les opérateurs - Assignment

- Assignment :



Les opérateurs - Comparaison

- Chacun de ces opérateurs de comparaison retourne True si la comparaison est respectée et False si ce n'est pas le cas
- Ces opérateurs de comparaison sont souvent utilisés dans des structures conditionnelles (voir ci-dessous)

- `>` : plus grand que
- `<` : plus petit que
- `>=` : plus grand ou égal a
- `<=` : plus petit ou égal a
- `==` : égal a
- `!=` : différent de

Exemples :

```
print(2 > 3) → False
print(3 > 3) → False
print(3 >= 3) → True
print(3 <= 3) → True
print(3 == 3) → True
print(4 == 3) → False
print(4 != 3) → True
print(3 != 3) → False
```

6.1.3 Les structures conditionnelles

Les structures conditionnelles

- if / elif / else :

```
if user == "admin":
    print("access allowed")
elif user == "client":
    print("access allowed")
else:
    print("access refused")
```

Outputs :

```
user = "admin" → access allowed
user = "client" → access allowed
user = "intrus" → access refused
```

- Opérateurs ternaires : la condition et l'association de la valeur de la variable se font sur la même ligne

```
age = 20
majeur = True if age >= 18 else False → True
```

- Opérateurs logiques (or and et not) :

```
8 > 3 and (4 < 9 or 10 > 18)
True      True      False
True      True
```

```
name = "Luca"
if not name=="Jhon":
    print("Le nom est incorrect")
Output :
Le nom est incorrect
```

Les listes

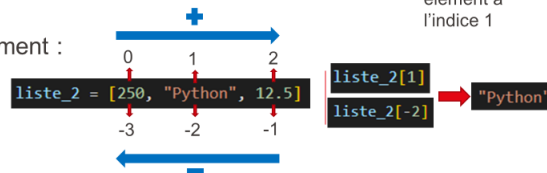
- Une liste peut être composée d'éléments de types différents :

```
liste_1 = [1,2,3,4,5,6]      liste_2 = [250, "Python", 12.5]
```

L'indice correspond à la position de l'élément dans la liste de 0 à n

- Ajouter un élément : `liste_1.append(7)` `liste_2.append("C++")`
- Ajouter une liste : `liste_2.extend(["Java", "React", "Angular"])`
- Retirer un élément (pas l'indice) : `liste_2.remove("Python")`
- Retirer un élément par son indice : `liste_2.pop(1)` → Enlève l'élément à l'indice 1

- Accéder à un élément :



Les listes (2)

- Accéder à une slice de la liste :

```
liste_3 = ["A2H", "Kaaris", "B20", "Heuss", "Ninho", "JUL"]
```

```
liste_3[1:3] → "Kaaris", "B20"  On commence avec l'élément d'index 1 et on s'arrête avant l'index 3
```

```
liste_3[:] → "A2H", "Kaaris", "B20", "Heuss", "Ninho", "JUL"  On prend tous les éléments de la liste
```

```
liste_3[:-2] → "A2H", "Kaaris", "B20", "Heuss"  On prend tous les éléments depuis le début et on s'arrête avant l'indice -2
```

```
liste_3[0:5:2] → "A2H", "B20", "Ninho"
```

On commence à l'indice 0 → On finit avant l'indice 5

On fait un pas de 2 donc on prend un élément sur 2

Les listes (3)

- Opérateurs d'appartenance (in / not in):

```
users = ["Julie", "Annie", "Marc"]

if "Paul" in users:
    print("C'est un utilisateur")

if "Paul" not in users:
    print("Ce n'est pas un utilisateur")
```

Output :
Ce n'est pas un utilisateur

- Liste imbriquée :

```
liste = ["Pierre", ["Marie", "Julie", ["Aude"]], "Emric"]
```

liste[0] → "Pierre"

liste[1][1] → "Julie"

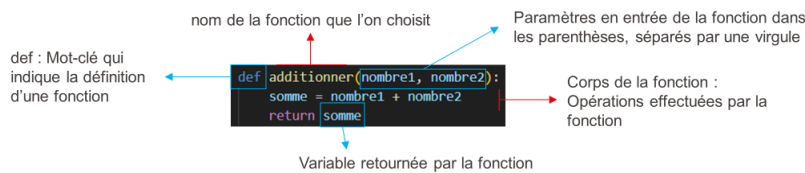
liste[1][2] → ["Aude"]

liste[1][2][0] → "Aude"

Méthode vs fonction

```
def additionner(nombre1, nombre2):
    somme = nombre1 + nombre2
    return somme
```

- Déclaration d'une fonction :



- Appel d'une fonction :

Arguments donnés à la fonction : nombre1 ← 5, nombre2 ← 3

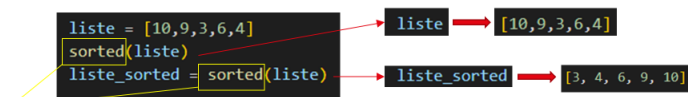
```
resultat = additionner(5, 3)
print("Le résultat de l'addition est :", resultat)
```

Résultat de la fonction
résultat ← somme

Méthode vs fonction (2)

- Une méthode est une fonction qui appartient à un objet.

Fonction :



Pour une fonction, il faut écraser ou assigner à une autre variable la liste sur laquelle elle s'applique pour sauvegarder la modification

Méthode :



Une méthode modifie directement l'objet sur lequel elle est appliquée



Ce n'est pas valable pour les chaînes de caractères ou les nombres (objets immuables)

Méthodes et fonctions utiles

- len()


```
len("Mathilde") → 8
len([1, 2, 3, 4]) → 4
```
- round()


```
round(10.2) → 10
round(10.7) → 11
```
- min() / max()


```
min([1, 2, 3, 4, 5]) → 1
max([1, 2, 3, 4, 5]) → 5
min("abcde") → "a"
max("abcde") → "e"
```
- sum()


```
sum([1, 2, 3]) → 6
sum([1, 2, "jul"]) → error
```

Ne fonctionne que sur des nombres
- range()


```
range(5) → [0, 1, 2, 3, 4]
range(2, 5) → [2, 3, 4]
```

6.1.4 Les boucles

Les boucles - for

- Sur une liste :

```
for element in liste:  
    #effectuer des operations avec element  
    print("calculs sur element finis")
```

5 itérations

```
for i in [0,1,3,5,8]:  
    print(i)
```

Output :

```
0  
1  
3  
5  
8
```

- Sur une chaîne de caractères :

```
for lettre in mot:  
    print(lettre)
```

6 iterations

```
for lettre in "Python":  
    print(lettre)
```

Output :

```
P  
y  
t  
h  
o  
n
```

- Répéter x (1000 ici) fois une opération :

```
for i in range(1000):  
    #Effectuer l'operation  
    print(i)
```

Les boucles – for (2)

- La fonction enumerate() permet de récupérer le compte de chaque itération de la boucle de 0 a n-1 éléments de la liste comme suit :

```
liste = ["rouge","blanc","vert","orange"]  
  
for count, color in enumerate(liste):  
    print(str(count)+" "+color)
```



Output :

```
0 rouge  
1 blanc  
2 vert  
3 orange
```

- La variable count commence à 0 et est incrémentée de 1 à chaque nouvelle itération de la boucle. On peut aussi utiliser cette variable comme argument pour sortir de la boucle.

```
for count, color in enumerate(liste):  
    print(str(count)+" "+color)  
    if count >=2:  
        break
```



Output :

```
0 rouge  
1 blanc  
2 vert
```

Les boucles - while

- Répéter x (1000 ici) fois une opération :

```
i=0  
while i < 1000:  
    print(i)  
    i += 1
```

A chaque itération l'output sera la valeur de l'indice tel que :

Output :

```
0  
1  
2  
...  
997  
998  
999
```

- Arrêter la boucle si la condition n'est plus remplie :

```
go_to_next = "y"  
while go_to_next == "y":  
    # Do calculation  
    go_to_next = input("Do you want to go to next iteration ? y/n")  
    print("We go to next iteration")
```

A chaque itération l'output sera : `we go to next iteration`

Les boucles – continue et break

- **continue**: cette instruction permet de passer directement à la prochaine itération. Elle est souvent associée à une condition dans la boucle.

Si élément est un nombre on passe à l'itération suivante

```
liste = ["1", "2", "a", "3", "b"]
for element in liste:
    if element.isdigit():
        continue
    print(element)
```

Output :

```
a
b
```

- **break** : cette instruction permet d'immédiatement quitter la boucle

On quitte la boucle seulement quand élément n'est pas un nombre

```
liste = ["1", "2", "a", "3", "b"]
for element in liste:
    if not element.isdigit():
        break
    print(element)
```

Output :

```
1
2
```

Les boucles – listes en compréhension

- Ces listes permettent d'écrire de façon compacte des actions simples itérées sur une liste :

```
liste = ["1", "2", "a", "3", "b", "c"]
chiffres = [i for i in liste if i.isdigit()]
print(chiffres)
```

Output :

```
['1', '2', '3']
```

- Il est aussi possible de modifier directement la valeur de l'élément dans la liste en compréhension :

```
liste = [-2, -1, 0, 1, 2, 3, 3, 4, 5]
chiffres_positifs = [i for i in liste if i > 0]
chiffres_positifs = [i*2 for i in liste if i > 0]
```

Output :

```
[1, 2, 3, 3, 4, 5]
[2, 4, 6, 6, 8, 10]
```

6.1.5 Les dictionnaires

EPFL Les dictionnaires - Déclaration

- Permet de stocker des données complexes
- Déclaration par ajout de paires clé-valeur :

```
# Création d'un dictionnaire vide
mon_dictionnaire = {}

# Ajout de paires clé-valeur
mon_dictionnaire["cle_1"] = "valeur1"
mon_dictionnaire["cle_2"] = "valeur2"
mon_dictionnaire["cle_3"] = "valeur3"
```

- Déclaration avec duo clé-valeur directement dans le dictionnaire :

```
mon_dictionnaire = {
    "cle_1": "valeur1",
    "cle_2": "valeur2",
    "cle_3": "valeur3"
}
```


EPFL Les dictionnaires – Accès

- Accéder à la valeur associée à une clé :

```
print(mon_dictionnaire["cle_2"]) → valeur2
```

- Accéder à la valeur associée à une clé avec get()

Valeur par défaut si "cle_2" n'est pas accessible dans le dictionnaire

```
valeur_1 = mon_dictionnaire.get("cle_2", "valeur_par_defaut") → valeur2
print(valeur_1)
valeur_2 = mon_dictionnaire.get("cle_inexistante", "valeur_par_defaut") → valeur par défaut
print(valeur_2)
```

EPFL Les dictionnaires – Accès dans une boucle

- Accéder aux éléments d'un dictionnaire dans une boucle:

```
mon_dictionnaire = {
    "cle_1": "valeur1",
    "cle_2": "valeur2",
    "cle_3": "valeur3"
}
```

```
for cle, valeur in mon_dictionnaire.items():
    print(f"Clé: {cle} - Valeur: {valeur}")
```

→

```
Clé: cle_1 - Valeur: valeur1
Clé: cle_2 - Valeur: valeur2
Clé: cle_3 - Valeur: valeur3
```

On fait une boucle sur chaque clé et sa valeur associée grâce à `mon_dictionnaire.items()`
Cette méthode va récupérer chaque clé et chaque valeur associée pour chacun des éléments du dictionnaire.

6.1.6 Les classes

EPFL Les classes – Déclaration

- Une classe en Python est un modèle pour la création d'objets. Elle définit à la fois les données et les méthodes qui agissent sur ces données.

class : définit la création d'une classe

Nom de la classe (une majuscule au début de chaque mot composant le nom)

`__init__()` est une méthode spéciale en Python appelée constructeur. Elle est appelée automatiquement lorsqu'un nouvel objet est créé. Elle initialise les attributs de l'objet.

```
class RappeurFrancais:
    def __init__(self, nom, age, album):
        self.nom = nom
        self.age = age
        self.album = album
    def description(self):
        return f"{self.nom}, {self.age} ans, a sorti l'album '{self.album}'"
```

self est une référence à l'objet lui-même et est utilisé pour accéder aux attributs et méthodes de l'objet

Méthode propre à la classe RappeurFrancais

EPFL Les classes – Utilité

- **Encapsulation :**

Les classes permettent d'encapsuler les données (les attributs) et les fonctionnalités (les méthodes) liées à un même concept. Cela favorise la modularité et la réutilisabilité du code.

- **Abstraction :**

Les classes permettent de représenter des concepts abstraits et des entités du monde réel. Elles cachent les détails d'implémentation et ne montrent que les fonctionnalités essentielles à l'utilisateur.

- **Héritage :**

Une classe peut hériter des propriétés d'une autre classe.

EPFL Les classes - Exemple

- **Classe : RappeurFrancais**

```
class RappeurFrancais:
    def __init__(self, nom, age, album):
        self.nom = nom
        self.age = age
        self.album = album

    def description(self):
        return f"{self.nom}, {self.age} ans, a sorti l'album '{self.album}'"
```

```
booba = RappeurFrancais("Booba", 45, "Trône")
```

↓ ↓ ↓
self.nom self.age self.album

EPFL Les classes – Exemple (2)

- **Classe : RappeurFrancais**

Objets de la classe
RappeurFrancais

```
booba = RappeurFrancais("Booba", 45, "Trône")
kaaris = RappeurFrancais("Kaaris", 42, "Or Noir")
```

```
print(booba.description())
print(kaaris.description())
```

Appel de la fonction description() de
l'objet de classe RappeurFrancais

```
Booba, 45 ans, a sorti l'album 'Trône'
Kaaris, 42 ans, a sorti l'album 'Or Noir'
```

```
class RappeurFrancais:
    def __init__(self, nom, age, album):
        self.nom = nom
        self.age = age
        self.album = album

    def description(self):
        return f"{self.nom}, {self.age} ans, a sorti l'album '{self.album}'"
```

6.1.7 Les librairies

EPFL Les librairies

- Une librairie est un ensemble de classes et de fonctions accessibles en ligne
- Pour pouvoir utiliser les classes et fonctions d'une librairie, il faut importer cette dernière avec import

```
import pandas as pd
```

Nom raccourci pour accéder aux éléments de la librairie

Nom de la librairie

Appel de la fonction read_csv() de la librairie pandas

```
my_file = pd.read_csv('chemin/de/mon/fichier.csv')
```

Pour importer une librairie, il est nécessaire de l'avoir téléchargée sur dans son environnement virtuel

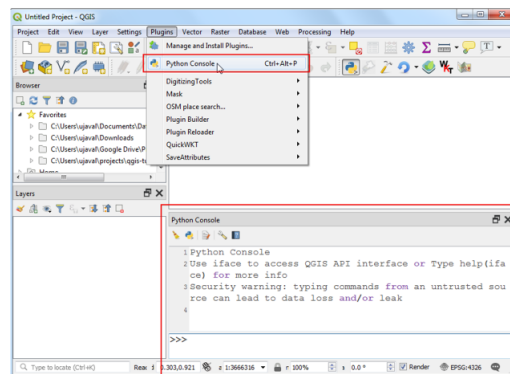
→ <https://docs.python.org/fr/3/tutorial/venv.html>

6.2 La console Python dans QGIS

QGIS intègre une console Python qui permet d'exécuter des scripts Python directement dans l'interface de QGIS. Cela offre une puissante capacité de traitement et d'analyse des données à référence spatiale, en combinant les fonctionnalités et la flexibilité de Python avec les fonctions existantes de QGIS. La console Python de QGIS offre un environnement de développement intégré (IDE) convivial avec une complétion automatique, une documentation contextuelle et un accès direct aux couches de données chargées dans votre projet QGIS.

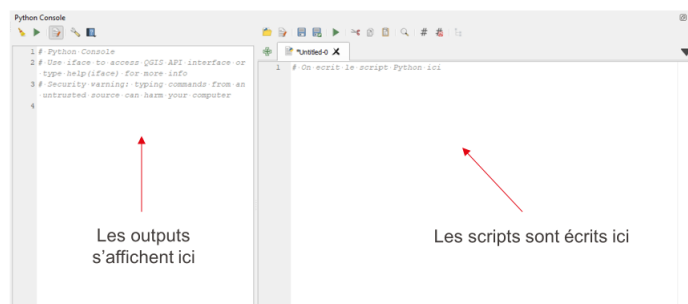
EPFL Console python dans QGIS

- La console Python dans QGIS se trouve dans Plugins > Python console (Ctrl + Alt + P)



EPFL Rédaction des scripts et affichage des outputs

- La console est composée de 2 parties, une partie pour écrire les scripts (code python) et une partie pour afficher les outputs :



EPFL Appel de librairie

- La console permet de créer des scripts en Python pour automatiser certaines tâches sur les couches et utiliser les fonctions de la toolbox
- Voici un exemple de code python permettant d'afficher le nom de tous les layers (couches) présents dans mon projet :

```
from qgis.core import QgsProject
```

Appel de la librairie qgis.core,
spécifique à QGIS

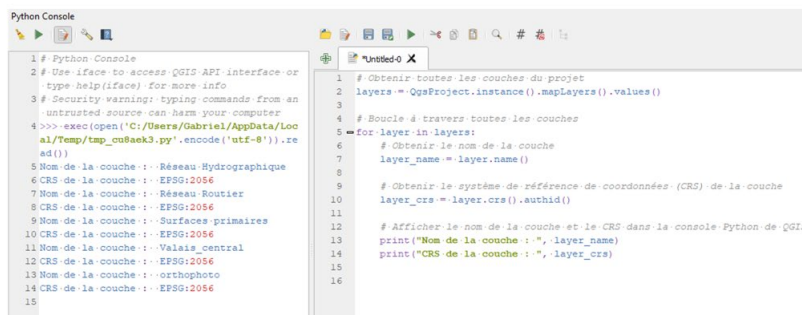
```
# Récupération de l'instance du projet courant
project_instance = QgsProject.instance()

# Boucle sur tous les layers présents dans le projet
# et affichage de leur nom
for layer in project_instance.mapLayers().values():
    print(layer.name())
```

Réseau Hydrographique
Réseau Routier
Surfaces primaires
Valais central
orthophoto

EPFL Afficher le système de coordonnées des couches

- Voici un exemple de code qui indique le CRS de toutes les couches présentes dans un projet :



EPFL Fonctions spécifiques à la librairie QGIS

Les fonctions spécifiques à la librairie QGIS peuvent être trouvées à ce lien :
https://docs.qgis.org/3.22/fr/docs/pyqgis_developer_cookbook/intro.html

Lorsque l'on travaille avec une librairie spécifique, il y a plusieurs étapes à respecter pour gagner du temps :

- Lire la documentation attentivement avant de se lancer
- *Stack Overflow* (<https://stackoverflow.com/>) et d'autres forums sont vos amis!
- Lorsque vous rencontrez une erreur, il est fort probable que quelqu'un d'autre y ait déjà fait face, vous trouverez probablement une réponse sur le Web.
- Lors d'une recherche sur internet, soyez le plus précis et explicite possible
- Pratiquer (coder!) le plus régulièrement possible afin de développer des automatismes

6.3 Les classes et méthodes `qgis.core` utiles

Dans le cadre de l'utilisation de Python dans la console QGIS, il est nécessaire de faire appel à la librairie `qgis.core` de QGIS. Cette librairie permet d'ouvrir des fichiers géoréférencés (.shp, .gpkg, .tiff, etc.) et de les transformer en couches dans QGIS pour pouvoir utiliser les fonctionnalités du logiciel dans la console python. Voici une liste non exhaustive des classes principales de la librairie `qgis.core` ainsi que quelques méthodes utiles et utilisées en séries d'exercice.

6.3.1 QgsProject

Cette classe rend possible la récupération du projet QGIS dans lequel le script est lancé. Elle permet :

1. d'accéder au nom de chemin correspondant au dossier de travail :

```
QgsProject.instance().homePath()
```

2. d'ajouter une couche au projet : `QgsProject.instance().addMapLayer(layer)` avec la couche (le layer) que l'on veut ajouter au projet.

La fonction suivante permet de récupérer une couche présente sur un projet QGIS par le nom de cette couche directement. Comme plusieurs couches peuvent avoir le même nom dans un projet, cette fonction retourne une liste de couches.

```
mapLayersByName(nom_couche)
```

Si vous êtes sûr d'avoir uniquement une couche avec un nom donné, la fonction

```
mapLayersByName(nom_couche)[0]
```

 accède à la couche ayant le nom `nom_couche` et apparaissant en premier dans la hiérarchie de votre le projet, et donc à la couche qui vous intéresse.

```
couche = QgsProject.instance().mapLayersByName('Communes_WGS84')[0]
```

6.3.2 QgsVectorLayer

`QgsVectorLayer(chemin_fichier, nom)` permet de charger une couche vectorielle à partir d'un chemin de fichier (`chemin_fichier`) et de lui donner un nom de couche spécifique (`nom`).

Pour récupérer une feature

`feature = couche.getFeature(1)`, pour les couches d'une seule feature par exemple ou alors `couche.getFeatures()` pour faire une boucle sur les différentes features.

Pour faire une requête SQL sur une couche

```
layer.setSubsetString(requete_SQL)
```

Cette méthode vous permet de récupérer le sous-ensemble d'une couche correspondant au résultat de la requête SQL donnée en argument de la méthode. Il est cependant nécessaire que layer soit une couche du projet. Cette méthode va directement écraser (transformer) la couche du projet pour n'afficher que le résultat de la requête SQL.

Exemple : Pour récupérer les communes des cantons de Vaud et Valais grâce à une requête SQL dans les données du projet partie 1 par exemple, il suffit de faire :

```
layer.setSubsetString(" SELECT * FROM Communes_WGS84 WHERE Commune='Vaud' ")
```

Pour créer un nouvel attribut

```
layer.dataProvider().addAttributes([QgsField(attribute_name,QVariant.type)])
```

où `attribut_name` est une chaîne de caractères comme par exemple `"pct_surface"`

`QVariant.type` est le type de variable conservée dans l'attribut comme par exemple : `QVariant.Double`, `QVariant.Int`, etc. Il faut donc changer type par `Int` ou `Double` par exemple.

Une fois les différents attributs créés, il est nécessaire de mettre à jour la couche avec la méthode `updateFields()` comme suit: `layer.updateFields()`

Pour ajouter une valeur ou modifier la valeur d'un attribut

Pour un feature spécifique, il est nécessaire d'activer le mode édition de la couche sur laquelle on fait ces modifications. Procéder comme suit :

```
with edit(layer) #appliquer les différentes modifications ici (sur une feature avec la couche en mode édition)
```

```
feature[«attribut_name »] = ...
```

```
layer.updateFeature(feature)
```

Il faut ensuite mettre à jour la feature dès qu'on a fini de la modifier avec la méthode `updateFeature(feature)` comme suit: `layer.updateFeature(feature)`

Pour supprimer un attribut

Il faut récupérer de l'attribut par le biais de son nom avec la méthode suivante :

```
indice = layer.fields().indexOfName(«attribut_name »)
```

Et ensuite supprimer l'attribut avec la méthode `deleteAttribute(indice)` comme suit:

```
layer.deleteAttribute(indice)
```

Attention, si vous ajoutez de nouveaux attributs et que vous les modifiez, soyez attentifs à bien mettre à jour les attributs et les features avant de supprimer un attribut pour ne pas causer de confusion au niveau des indices.

6.3.3 QgsRasterLayer

Pour ouvrir une couche raster

Il faut utiliser la méthode suivante :

```
raster_layer = QgsRasterLayer(raster_path)
```

Pour créer un buffer

Par exemple sur le centroïde des différents éléments d'une couche de polygones, il est nécessaire de transformer la géométrie de ces éléments en points avec la méthode suivante :

```
centroid = feature.geometry().centroid.asPoint()
new_geom = QgsGeometry.fromPointXY(centroid).buffer(length, 30)
```

Vous devez ensuite appliquer cette géométrie à la feature avec la méthode suivante :

```
couche_buffer.changeGeometry(feature_id, new_geom)
```

Ici `feature_id` est l'id de la feature que vous pouvez récupérer avec `feature.id()`.

Cartographie thématique

La représentation de l'information géographique et la communication de l'information récoltée ou traitée sont souvent réalisées au travers de cartes thématiques. Pour permettre une bonne interprétation, l'élaboration de ces cartes doit suivre les règles de la sémiologie graphique, soit l'ensemble des techniques et méthodes visant à adapter un mode de représentation graphique à l'information représentée en fonction de codes (perceptifs et esthétiques) et de conventions (habitudes culturelles, symbolique du signe).

Les règles et conseils appliqués dans ce cours proviennent de trois sources différentes : De la graphique de Jacques Bertin, de Roger Brunet (groupement d'intérêts publics Reclus à Montpellier) ainsi que de Micheline Cosinschi de l'Université de Lausanne.

7 Cartographie thématique

7.1 Les composantes et fonctions de la carte

7.1.1 Cartographie

La cartographie est une science, un art et une technique. Une science, car elle se base sur des fondements mathématiques (forme de la terre, systèmes de projection, etc.). Un art, car elle est une expression graphique capable de présenter des qualités esthétiques et didactiques. Une technique, car la réalisation des cartes passe par la mobilisation d'outils et de technologies (images satellites, informatiques, etc.). La cartographie a pour but la représentation de la Terre (ou autres corps célestes) sous une forme géométrique et graphique. Elle est un système de signes synoptiques permettant de communiquer comme le langage.

La carte est la projection de l'espace géographique sur un plan (passage de trois à deux dimensions). La carte est donc premièrement une représentation de tout ou d'une partie de la surface de la Terre sur un plan. Sa représentation désigne l'image mentale associée aux phénomènes géoréférencés et le processus de création de la carte. Elle est aussi un outil permettant de comprendre et d'interpréter les agencements spécifiques d'objets dans l'espace géographique et elle permet la transmission et le stockage de l'information.

7.1.2 Les différents types de cartes

La carte thématique est une représentation graphique de la distribution spatiale d'un ou plusieurs attributs d'un phénomène quantitatif ou qualitatif. Elle représente au minimum un thème et propose une simplification de la réalité au moyen d'éléments identifiables. Elle permet donc de décrire la répartition géographique d'un phénomène et de sa variabilité spatiale sans que la localisation précise des objets soit nécessaire.

La carte topographique est une carte particulière représentant l'occupation du sol, mais dont la localisation précise des objets sur le territoire est primordiale. Elle n'est donc pas incluse dans la catégorie des cartes thématiques.

La carte d'inventaire est une carte thématique descriptive. Délicate à réaliser car elle demande de localiser avec précision une information abondante en assurant la meilleure lisibilité possible.

La carte thématique statistique est élaborée par la représentation simultanée d'unités spatiales (comptés, communes, etc.) et de données qualitatives ou quantitatives (taux de chômage, naissance, qualité de vie, etc.). Ces cartes requièrent un traitement de l'information faisant appel à des connaissances statistiques et méthodologiques précises et impliquent une lecture interprétative de la carte. Elles sont souvent utilisées pour représenter des phénomènes dont l'ampleur ne permet pas de les représenter efficacement sous forme de tableaux de chiffres. L'information géographique est souvent présentée sous forme de surfaces et de polygones colorés (cartes choroplèthes) ou sous forme de symboles proportionnels lorsque l'information est ponctuelle.

La carte thématique d'aménagement est produite dans le cadre d'étude d'impact ou de planification du territoire. Elle associe l'information des infrastructures urbaines, des milieux naturels et des informations socio-économiques. Elle est utilisée comme support de communication pour les spécialistes et le grand public moyennant certaines adaptations. Les plans d'aménagements, les cartes de risque et les cartes de danger sont tous des exemples de cartes d'aménagement.

Les cartes permettent de représenter et communiquer une information géoréférencée. Elles peuvent représenter et explorer de gros volumes de données complexes en les synthétisant et en les structurant de manière à mettre en évidence les différences dans l'espace géographique. L'esthétique plaisante des cartes leur permet de transmettre facilement l'information. La carte est donc un moyen intégré permettant d'informer, de rechercher, de réfléchir, d'enseigner et de prendre des décisions. Ses avantages sont une expression simultanée de l'information permettant la mise en évidence de

propriétés spatiale imperceptible par d'autres moyens, la localisation relative des objets les uns par rapport aux autres permettant de révéler les structures spatiales et la réduction de l'espace géographique (projection sur plan et échelle) et de l'information à traiter (légende). Néanmoins, la carte est aussi une simplification de l'information et son esthétique peut parfois dominer et fausser l'interprétation de l'information véhiculée. Les cartes en papier sont également statiques, excluant de ce fait la représentation temporelle de l'information.

7.1.3 Les composantes de la carte

La carte est constituée de plusieurs éléments. Elle est un système de signes régis par les règles de la sémiologie graphique. L'image constituée par la carte est l'équivalent d'un langage destiné aux fonctions cognitives de l'être humain. Elle exploite le sens de la vue et obéit à des règles définies de sémiologie graphique. Cette image est plane et déformée en raison de la projection du géoïde sur le plan. Elle est aussi réduite par l'échelle de représentation appliquée. Cette image est aussi un assemblage de *signes* conventionnels et de symboles utilisés pour représenter des éléments spatiaux.

Un signe est défini en sémiologie par la composition d'un signifié désignant la représentation mentale d'un concept et d'un signifiant désignant l'image acoustique d'un mot. L'ensemble est appelé sème ou unité de sens.

Les signes laissent donc beaucoup de place à l'interprétation. Pour éviter les confusions dans l'analyse des cartes, des conventions admises ou contrôlées par les règles de sémiologies graphiques sont utilisées (Nord situé en haut de la carte, légendes, etc.). La légende permet de lister les signes utilisés et donne une justification aux écarts envers les conventions.

Les composantes principales de la carte sont listées dans le tableau 7.1. Les composantes systématiques doivent toujours apparaître sur la carte car elles en assurent une interprétation correcte. Les autres composantes dépendent du contexte.

Tableau 7.1 Composantes de la carte qui doivent être systématiquement représentées (colonne de gauche) ou qui le sont selon le contexte (colonne de droite).

Composantes de la carte thématique	
Systématiques	Selon le contexte
Titre	Orientation si le nord n'est pas en-haut
Echelle	Date de création de la carte
Cadre	Commentaire
Légende	Système de coordonnées
Source des données	Encadré avec zoom sur région
Date des données	Labels
Auteur	Index
	Graticule
	Nomenclature

Les cartes autonomes doivent faire apparaître, en plus des éléments systématiques, un titre, le nom des auteurs, la date de création et une information sur les unités spatiales. Si la carte autonome est sortie de son contexte, il est obligatoire de faire apparaître un commentaire. Les labels, les zooms, l'affichage du graticule, une nomenclature ou un index sont généralement utilisés dans le cas de cartes d'aménagement.

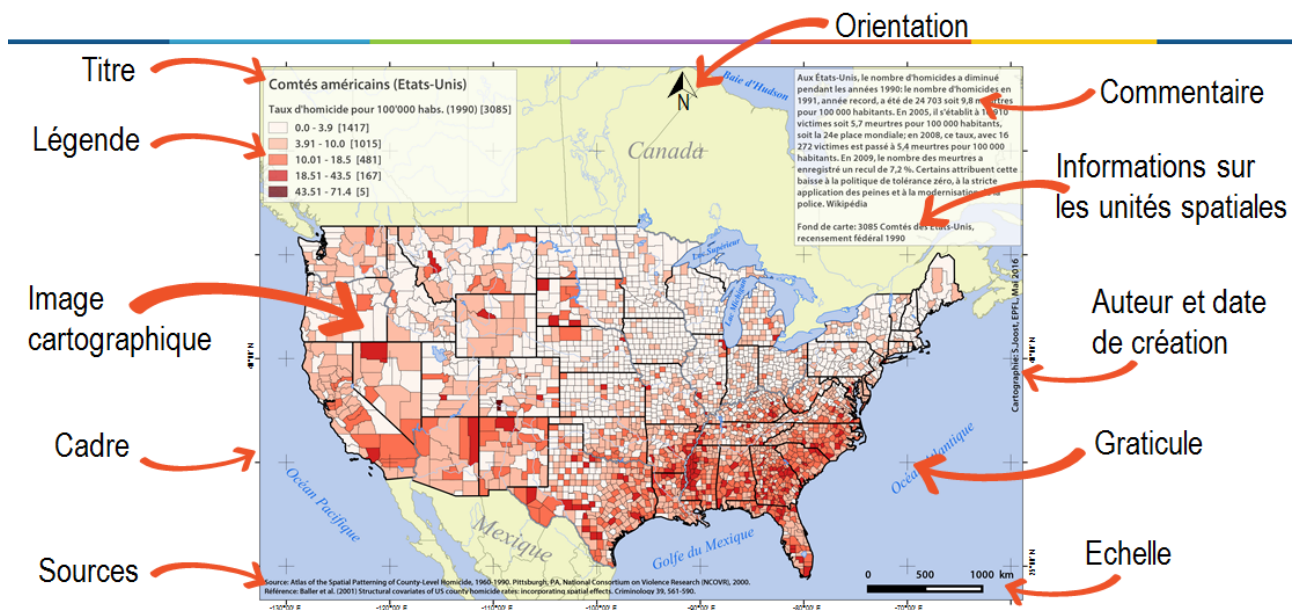


Figure 7.1 Les composantes de la carte

7.1.4 Les fonctions de la carte

Les trois fonctions majeures de la représentation graphique identifiées par Bertin sont l'enregistrement, le traitement et la communication de l'information.

La fonction d'enregistrement fournit un inventaire commun et exhaustif de l'information. Cette fonction aboutit à des cartes à lire, créant une mémoire artificielle qui évite l'effort de mémorisation. C'est le cas des plans de métro.

La fonction de traitement est un processus de réduction de l'information (la classification, la catégorisation, etc.) qui permet d'obtenir un schéma synthétique plus facile à mémoriser. Les cartes thématiques statistiques utilisent cette fonction.

La fonction de communication consiste à donner les moyens de retenir une information à l'aide de la mémoire visuelle. Elle produit une image simple qui favorise la mémorisation de l'information sans qu'elle soit exhaustive.

Le processus permettant l'élaboration d'une carte thématique statistique peut être expliqué en 4 étapes. Une première étape d'acquisition des données formées d'attributs et d'unités spatiales. Une seconde étape de traitement des données dans laquelle une simplification et une classification des données peuvent être faites. Une troisième étape de représentation en utilisant un système de signes et de symboles conventionnels. Une dernière étape d'édition pour affiner et améliorer le rendu graphique.

7.2 Les variables visuelles

La représentation cartographique utilise un système de signes pour coder de l'information et la transmettre visuellement. L'encodage de cette information est composé de structures visuelles définies par des points, des lignes, des surfaces et des volumes. Les variations des propriétés de ces structures sont les variables visuelles et leur utilisation est régie par les règles de la technologie graphique.

7.2.1 La graphique

Les cartes sont le fruit d'une réalisation ou d'une mise en scène réalisée par des moyens techniques (crayons, ordinateurs, etc.), reflétant un certain point de vue et désirant atteindre un certain but. La graphique est une discipline développée par Jacques Bertin dans les années 1950 décrivant les principes de l'information cartographique. Elle est un système de signes permettant de transcrire des relations de différences d'ordre ou de proportionnalité entre données quantitatives et qualitatives dans les deux dimensions du plan.

7.2.2 Les structures visuelles

Il existe quatre familles de structures visuelles : les points ; les lignes ; les surfaces ; les volumes. L'information à cartographier est codée sur la base de ces structures visuelles. Ces dernières ne sont pas indépendantes entre elles et c'est le contexte qui permet de définir leur signification. En effet, c'est la perception visuelle qui permet la reconnaissance de modèles dans un ensemble de structures.

Les lois correspondant à l'interaction entre les structures visuelles sont définies par la Gestaltpsychologie, une psychologie de la forme. Elles sont listées dans le tableau 7.2. Ces éléments sont facilement applicables à l'élaboration d'une représentation cartographique.

Tableau 7.2 Lois d'interactions entre structures visuelles

Lois	Effets
Prégnance	Une image est facile à comprendre si sa structure est simple
Proximité	Deux composants qui sont proches ont tendance à être perçus comme un seul composant.
Similitude	Les composants similaires sont perçus comme s'ils étaient regroupés.
Fermeture	Les contours proches sont perçus comme unifiés.
Continuité	Des éléments voisins sont perçus groupés lorsqu'ils possèdent potentiellement un trait qui les relie.
Symétrie	Des éléments sont perçus comme un élément global lorsqu'ils forment une symétrie.
Trajectoire	Des éléments qui se déplacent avec la même trajectoire semblent groupés.
Familiarité	Des éléments sont plus facilement groupables si le groupe est familier.

7.2.3 Les variables visuelles

Les variables visuelles sont les variations des propriétés des structures visuelles (couleurs, épaisseur ...). Selon Bertin, il existe huit types de variables visuelles:

- La *position* composée des deux variables X, Y.
- La *taille* qui traduit les variations quantitatives
- La *valeur* ou la variation de l'intensité lumineuse du clair au foncé. Elle traduit une relation d'ordre et de différence relative.
- La *forme* qui exprime l'identité d'un objet.
- L'*orientation* qui permet de positionner un signe par rapport aux axes du graphique. Elle exprime les différences et gagne en efficacité lorsqu'elle est utilisée avec les variables de grain et de valeur.
- La *couleur* qui permet de traduire des différences, mais ne peut pas les ordonner entre-elles.
- Le *grain* ou la résolution combine la forme et la taille. Il traduit une relation d'ordre et de différence relative.

Les variables de position, de taille et de valeur sont les *variables de l'image*. Elles permettent de construire des plages de visibilité variables (propriété dissociative), font apparaître des formes sur un fond et suggèrent des reliefs.

Les autres variables sont les *variables de séparation*. Elles construisent des plages de visibilité homogènes (propriété associative) et sans relief. Elles ne font pas apparaître de forme sur le fond, mais permettent de séparer les éléments entre eux.

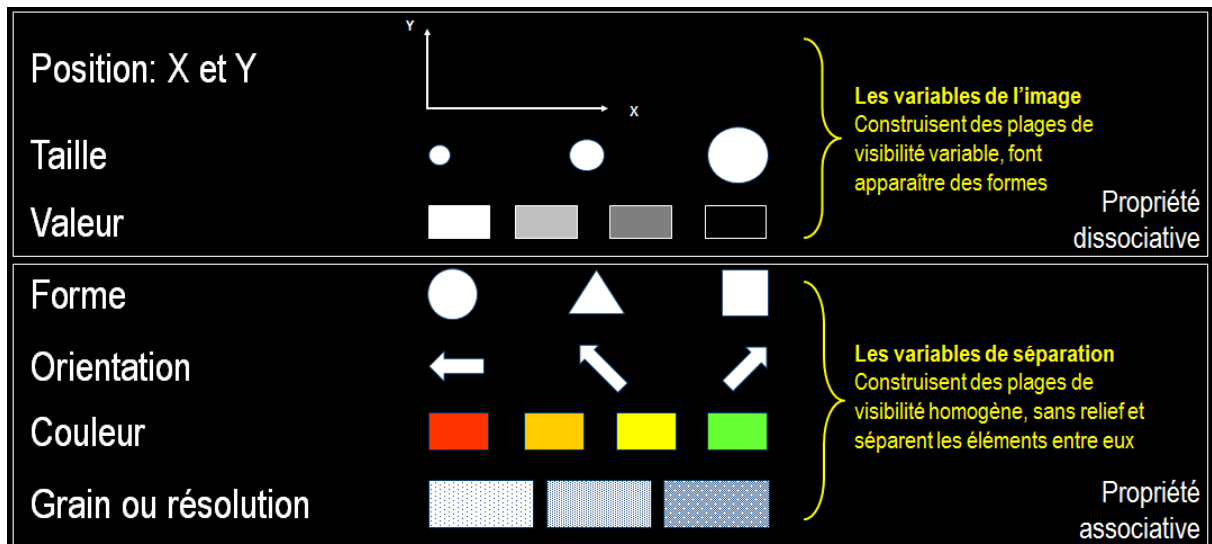


Figure 7.2 Les variables visuelles

Dans le cas des surfaces d'une carte choroplèthe, la taille et la valeur permettent une forte différenciation, créent un ordre visuel et construisent des hiérarchies.

La forme ne permet pas de transcrire des différences. Elle est associative et sa sélectivité est nulle.

L'orientation est associative. Elle permet de construire des plages de visibilité homogènes et sa sélectivité est très faible.

La couleur associée à la valeur est fortement sélective et ordonnée. Mais une gamme de couleurs d'égales valeurs construit une image sans relief

Le système graphique de Bertin considère huit variables visuelles applicables à trois types d'implémentations (points, lignes et surfaces) et possédant cinq propriétés différentes (quantitative, ordonnée, sélective, dissociative et associative) permettant de transcrire les relations de proportionnalité, d'ordre et de ressemblance entre les données.

7.2.4 Graphique et perception

Pour maximiser l'efficacité de la représentation graphique, il est important de comprendre et de connaître les caractéristiques des variables visuelles. Chaque variable visuelle comporte un certain nombre de degrés discrets. La longueur d'une variable visuelle est le nombre de paliers sensible qu'une variable visuelle peut supporter et l'étendue d'une variable visuelle est l'écart qui sépare les valeurs extrêmes du paramètre.

La longueur de la valeur est très présente dans les cartes choroplèthes car elle est utilisée pour fixer le nombre de classes dans le processus de discrétisation. L'utilisation de la longueur permet de trouver le nombre de classes dont les seuils sont perceptibles par l'œil de la majorité des utilisateurs.

La valeur est liée à la notion de luminosité en théorie des couleurs et ne dépend pas de la chromaticité. Le nombre de seuils perceptif dépend donc de la valeur du fond de carte et de la taille des éléments graphiques. Un maximum de six seuils perceptif (longueur = 7) est communément admis comme

idéal. La variation de la valeur étant ordonnée, il est important d'utiliser la valeur lorsque l'ordre entre variables fait sens. Par exemple, utiliser un dégradé de gris pour représenter des classes qualitatives est une erreur et compromet l'information. Il est aussi important de noter qu'il est de bon usage de réserver le blanc aux données manquantes. Il ne doit pas être intégré comme classe initiale dans un dégradé de valeurs.

Les cartes thématiques statistiques sont des supports pour la pensée et permettent d'améliorer le processus cognitif. L'efficacité de ces cartes, en plus de la qualité de leurs représentations, dépend également de la qualité de l'image à être une forme visualisable et perceptible dans l'instant minimum de vision. Toute représentation cartographique présentant plus de trois composantes ne peut donc pas être construite en une seule image et nécessite l'élaboration de plusieurs cartes.

7.2.5 La couleur

La couleur peut être décrite par trois composantes :

- La teinte qui est la forme pure de la couleur
- La saturation qui est l'intensité de la coloration
- La luminosité qui est l'impression de clarté associée à la couleur

Les couleurs sont codées informatiquement afin de permettre la combinaison efficace des niveaux de teintes, de saturations et de luminosités lors de leur application aux structures visuelles.

Informatiquement, les couleurs sont représentées par un triplet de valeurs se rapportant à chacune des couleurs primaires de la synthèse additive RVB (rouge, vert et bleu). Les codes des couleurs sont des nombres entiers bornés entre 0 et 255, soit 256 valeurs sur un octet.

Néanmoins, l'utilisation des couleurs primaires pour représenter les couleurs n'est pas évidente à utiliser. Pour cela, les logiciels d'édition de cartes offrent la possibilité d'ajuster la teinte, la saturation, la valeur et la transparence et traduisent directement ces paramètres en RVB. Néanmoins, ce système reste toujours compliqué et ne permet pas de choisir efficacement une palette de couleur adéquate pour une représentation cartographique.

Un choix judicieux peut être fait soit en utilisant les palettes de couleurs prédéfinies dans le logiciel QGIS par exemple, ou en utilisant l'outil développé par Cynthia Brewer du GeoVISTA Center. Cet outil permet de visualiser directement l'effet des choix des paramètres sélectionnés sur la base d'une série de palettes prédéfinies garantissant une efficacité optimale.

La couleur est fortement sélective et permet une bonne discrimination dans les teintes rouges et violettes, mais la discrimination est moins bonne dans les teintes jaunes. La couleur est ordonnée si sa relation d'ordre est transcrite par la variable visuelle valeur. Dans le cas de l'utilisation de couleurs différentes, la valeur transcrivant la relation d'ordre est perçue avant la teinte qui, elle, permet la sélection. L'efficacité de la couleur diminue également avec la surface des structures visuelles. La combinaison de la variation de la teinte et de la variation de la valeur offre plus de seuils perceptifs.

La couleur à l'avantage d'être associée à une forte attractivité psychologique et rends l'information plus facilement mémorisable. Son désavantage est le coût élevé de la diffusion des documents couleur non électroniques et la difficulté à tenir compte des utilisateurs souffrant d'anomalie de la perception visuelle.

7.3 Attributs thématiques et mise en classes

L'information portée par une carte thématique est représentée par les attributs des unités géographiques. Dans la phase de traitement de l'information, il est nécessaire de généraliser cette dernière au moyen de la classification et de la catégorisation. Cette généralisation se base sur plusieurs notions importantes :

- L'**unité spatiale**. Une unité d'observation indivisible et géoréférencée (polygones, lignes, points)
- La **distribution spatiale** est la notion de fréquence à laquelle un phénomène apparaît dans l'espace géographique
- La **structure spatiale** est la notion d'organisation de l'information
- Le **processus spatial** est le mécanisme qui engendre les structures spatiales des distributions.

L'information est stockée sous forme de tableau à double entrée. Les lignes horizontales représentent les unités spatiales étudiées et les colonnes verticales stockent les attributs thématiques. Les unités spatiales sont toujours marquées par un identifiant unique contenu dans une variable spéciale. Cet identifiant permet d'assurer l'unicité des unités spatiales.

Il existe deux principaux types de variables thématiques : les variables quantitatives et les variables qualitatives.

Une variable est quantitative lorsque sa valeur prend des nombres reflétant une notion de grandeur (comptage, mesures ...). Les variables quantitatives sont discrètes ou continues. Elles sont discrètes lorsque l'information qu'elles représentent prend un nombre fini de valeurs entre deux valeurs quelconques et continues lorsque cette information prend un nombre infini de valeurs entre deux valeurs quelconques. Les variables quantitatives discrètes dénombrent et les variables quantitatives continues approximent.

Une variable est qualitative lorsque l'information caractérisant chaque unité spatiale n'est pas représentative d'une quantité. Les valeurs prises par cette variable sont appelées modalités. Une variable qualitative est dite nominale si ses modalités ne peuvent être ordonnées. Elle est ordinale dans le cas contraire.

Les variables peuvent donc être quantitative discrète, quantitative continue, qualitative nominale ou qualitative ordinale.

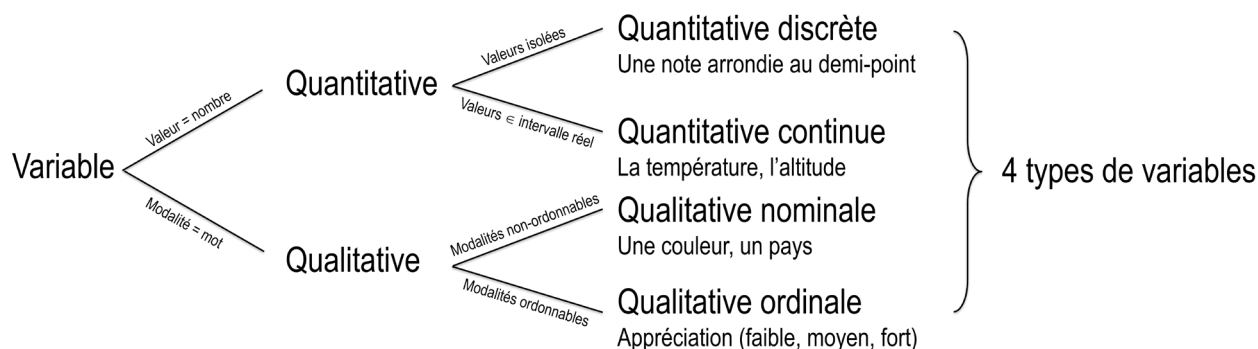


Figure 7.3 Les quatre types de variables : quantitative discrète, quantitative continue, qualitative nominale ou qualitative ordinale

Certaines règles s'imposent dans le cas de variables quantitatives. Une **variable quantitative brute** issue d'un comptage ou d'un dénombrement **doit obligatoirement être représentée en utilisant la variable visuelle de la taille** (Fig.7.4). En effet, la taille peut directement représenter les variations quantitatives par une variation de la surface d'un symbole (cercles proportionnels par exemple). Si la variable statistique est relative (moyenne, taux, rapport...), elle est valable en tout point de la surface des unités spatiales. Il est possible de la représenter en utilisant la variable visuelle de la valeur et de la couleur (Fig.7.5).

Figure 7.4 Représentation d’une variable quantitative absolue (nombre d’habitants) sur une carte en symboles proportionnels.

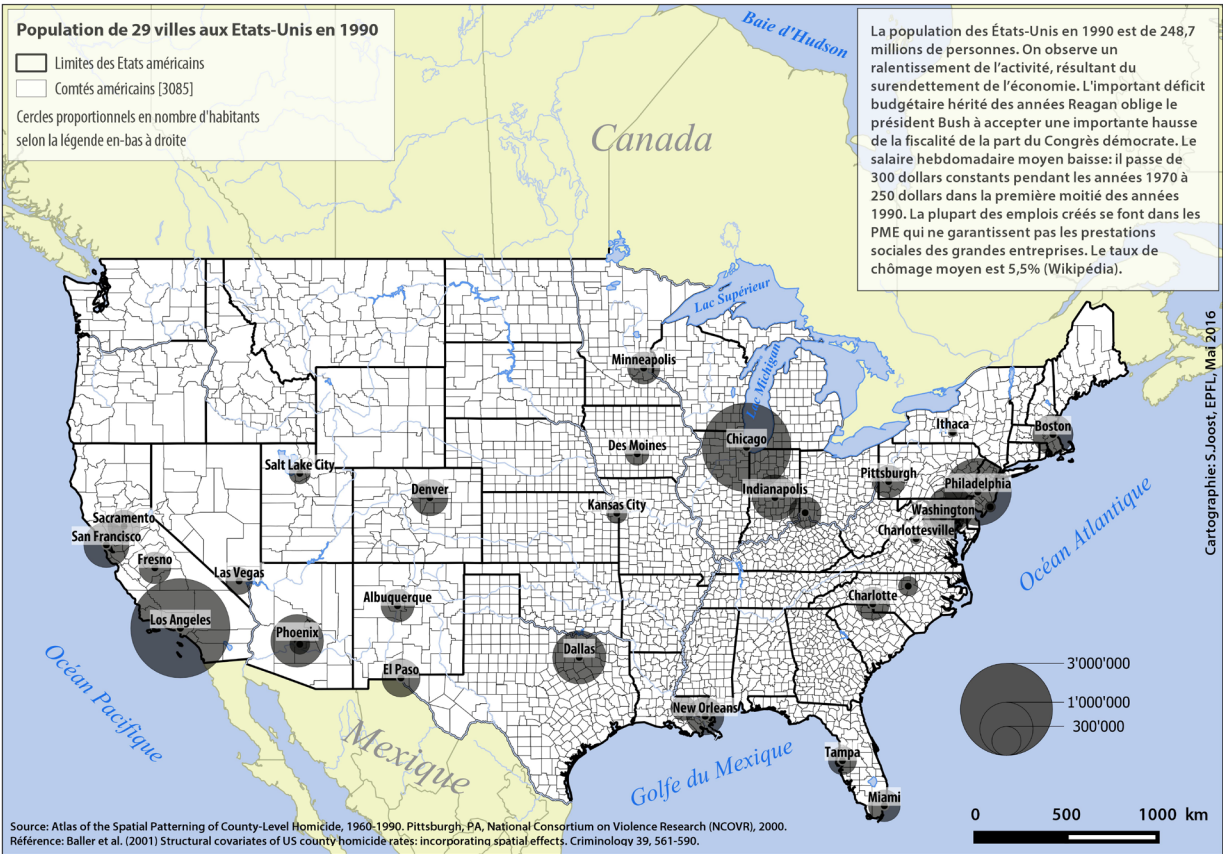
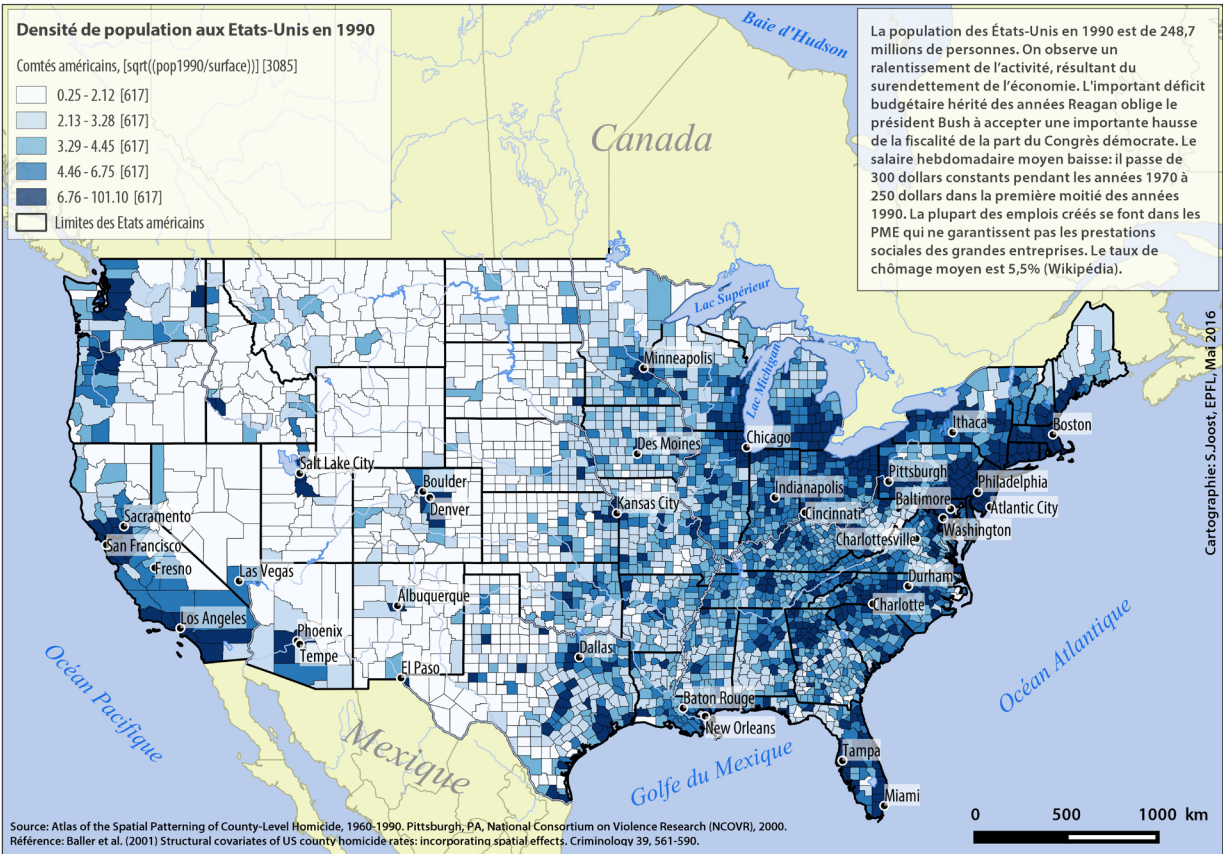


Figure 7.5 Représentation d’une variable quantitative relative (densité de population) sur une carte choroplèthe.



7.3.1 Carte en symboles proportionnels

La représentation cartographique d'une valeur absolue en symboles proportionnels s'applique par une relation mathématique entre la distribution statistique des valeurs et la surface des symboles à représenter sur la carte. La surface des symboles est donc le paramètre qui varie proportionnellement.

L'application de cette relation mathématique demande la connaissance préalable de la distribution statistique de la variable choisie.

Le choix d'un ratio entre la valeur de la variable et la surface du symbole proportionnel se base sur plusieurs contraintes. L'étendue (plage de valeur entre min et max) est la base sur laquelle ce choix est défini ; les caractéristiques de la dispersion ont un impact sur la construction de la carte. En effet, une dispersion faible des valeurs risque de mener à la construction d'une carte dont les symboles ont tous une taille similaire et une dispersion forte risque de faire apparaître uniquement de très petits et de très grands symboles.

De manière concrète, il est primordial de dimensionner les plus gros symboles pour qu'ils ne masquent pas le fond de carte et que leur emprise n'affecte pas les plus petits symboles. Lorsque le dimensionnement ne parvient pas à satisfaire l'exigence de lisibilité, il peut être nécessaire de décomposer la carte en deux vues, par un zoom par exemple, en prenant soin d'ajuster la règle de proportionnalité pour les deux vues.

La représentation d'une variable dont la dispersion n'est pas trop forte commence par l'identification de la valeur maximum à représenter pour déterminer la taille du plus gros symbole. Le ratio de représentation de toutes les autres valeurs est basé sur la valeur maximum. Ainsi pour une valeur maximum et un rayon maximal à représenter, il est possible de calculer la surface (S) en pixel² ($S = \pi \cdot r^2$, pour un cercle) à partir du rayon maximum et ensuite, à l'aide d'une règle de trois, de déduire la surface et les rayons des autres valeurs.

Lorsque la variable à représenter est trop dispersée, il est nécessaire de transformer le ratio en passant d'un ratio linéaire (valeur*ratio = Surface) à un ratio logarithmique ($\log(\text{valeur}) \cdot \text{ratio} = \text{surface}$) ou racine ($\sqrt{\text{valeur}} \cdot \text{ratio} = \text{surface}$). Il est obligatoire d'indiquer dans la légende le type de transformation opérée.

7.3.2 Cartes en plages de couleurs

Les cartes thématiques en plages de couleur sont réparties en deux groupes. Le groupe concernant les données qualitatives nominales et ordinales et les cartes choroplèthes produites à partir de données quantitatives relatives.

La carte en plages de couleurs se construit en plusieurs étapes. La discrétisation est une opération permettant de classer la distribution statistique des valeurs d'une variable. Elle a pour but de simplifier l'information en regroupant les objets géographiques de même caractéristiques en classes homogènes et distinctes. La discrétisation est l'étape finale de la réduction, de l'organisation et de la hiérarchisation de l'information. Elle doit satisfaire aux règles de la sémiologie graphique et de la statistique afin de perdre le moins d'information possible tout en optimisant la perception visuelle et la transmission de l'information.

La discrétisation est applicable aux variables quantitatives et qualitatives. Dans le cas de la discrétisation de variables qualitatives nominales, l'information est généralisée en fonction de la hiérarchie. Par exemple, les comtés des États-Unis peuvent être classés selon leur appartenance aux États ou selon des classes comprenant les États du Nord et les États du Sud par exemple. Dans de telles cartes, il est important de maximiser la discrimination visuelle entre unités spatiales. Pour les variables qualitatives ordinales, la discrétisation se base sur le rang.

Les cartes choroplèthes sont particulièrement adaptées à la représentation des variables quantitatives relatives. Elles présentent des mesures transformées par calcul pour produire des rapports, des

pourcentages et des distributions continues. L'élaboration de ce type de carte se base sur une mise en classe pertinente et un choix adéquat des teintes et des valeurs de teinte.

7.3.3 Nombre de classes et indice de Huntsberger

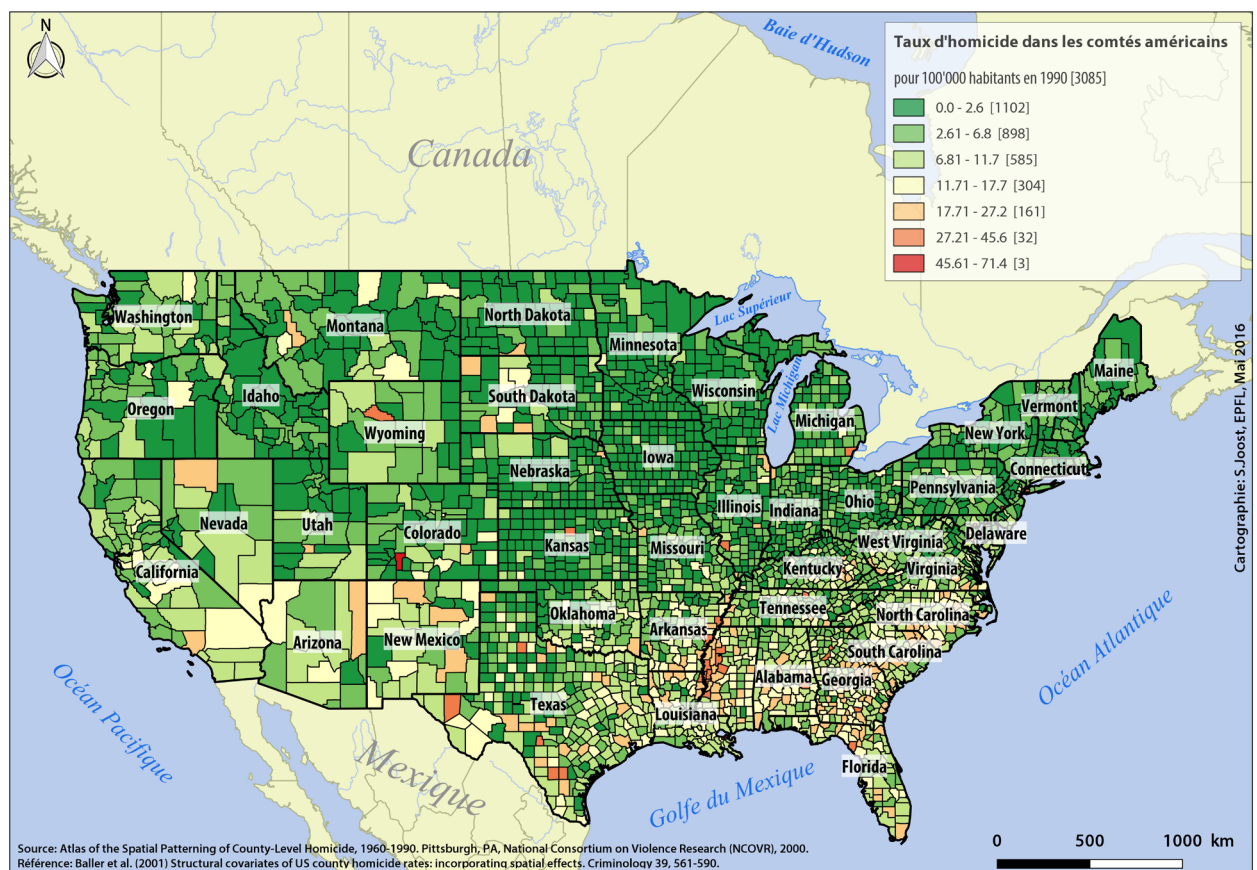
L'indice de Huntsberger permet d'évaluer le nombre de classes par la formule suivante :

$$N_{cl} = 1 + 3.3 \log_{10}(N_{obs})$$

où N_{cl} indique le nombre de classe et N_{obs} le nombre d'observations.

Toutefois, cet indice n'est pas satisfaisant en présence d'une grande quantité d'objets à représenter car le nombre de seuils perceptifs du système visuel humain est de **maximum 6**. Un nombre impair de classes est souvent choisi puisqu'il permet d'insérer une classe médiane représentant un comportement moyen. Cette classe médiane rend également possible ce qui suit : l'augmentation du nombre de seuils exploitable peut être réalisée en utilisant un gradient de valeurs pour deux teintes. Une des teintes est utilisée pour représenter les valeurs les plus basses et l'autre pour les valeurs élevées. Les deux teintes s'articulent autour d'une même teinte neutre.

Figure 7.6 Augmentation du nombre de seuils perceptifs en utilisant un gradient de valeurs pour deux teintes développées à partir d'une classe médiane à teinte neutre.



L'utilisation d'un nombre impair de classes est donc généralement recommandée sauf dans le cas où la valeur traitée représente deux comportements opposés, par exemple dans un système de votation. Cette méthode permet d'augmenter le nombre maximum théorique de classes à 12, mais reste délicate car il est nécessaire d'expliquer le système de la double gradation aux utilisateurs et le choix des couleurs doit être cohérent avec le thème présenté.

Tableau 7.3 Cinq méthodes de discrétisation standard.

Méthode	Définition	Calcul	Remarques	Type de distribution
Écart à la moyenne	Toutes les classes ont une même étendue égale à l'écart-type, sauf les classes extrêmes	Moyenne et écart-type	Si le nombre de classes est impair, la classe centrale est à cheval sur la moyenne. Intérêt: se repérer par rapport à la moyenne, mettre en évidence les extrêmes, comparer plusieurs cartes	Normale (Gauss) avec concentration des données autour de la moyenne, éventuellement peu asymétrique
Égale amplitude	Les intervalles de classes sont égaux (intervalles constants)	(Valeur maximale - valeur minimale) / nombre de classes	Méthode simple, facile à interpréter, mais peu utilisée car ne convient pas si la distribution des valeurs est asymétrique : les classes peuvent être très inégales et certaines vides. Pas de comparaison possible	Distribution uniforme (données réparties uniformément sur toute l'amplitude de la série), normale (Gauss) avec concentration des données autour de la moyenne
Seuils naturels	Seuils observés	Observation de l'histogramme de fréquences cumulées triées dans l'ordre croissant	Prend en compte les discontinuités de la série Cartes non comparables	Toute distribution qui présente des discontinuités Distribution plurimodale
Quantiles	Chaque classe a le même nombre d'individus	Effectif total / nombre de classes Limites de classes= nb d'individus défini par le calcul ci-dessus, statistique d'ordre	Ne tiens pas compte des valeurs exceptionnelles. Des limites de classes peuvent être discutables (valeurs très proches réparties dans des classes différentes) Permet les comparaisons	Distribution uniforme ou autre distribution sans discontinuités À éviter si présence de valeurs extrêmes ou si trop grand nombre de valeurs proches
Box map	Classes basées sur l'analyse en boxplot ou boîte à moustaches	6 classes: quartile 1 (Q1), Q2, Q3, Q4, outliers inférieurs ($Q1 - [1.5 \times (Q3 - Q1)]$), outliers sups. ($Q1 + [1.5 \times (Q3 - Q1)]$)	Statistique d'ordre, permet les comparaisons, implémentée dans Geoda	Toute distribution, adéquat pour traiter des valeurs exceptionnelles

7.3.4 Détermination des limites de classes

Lorsque le nombre de classes est connu, il est nécessaire de répartir les données dans les classes en procédant à la discrétisation de l'information. La nature de l'information définit la méthode utilisée pour la discrétisation. Les variables qualitatives nominales ne demandent pas de méthode spécifique, mais sont regroupées selon un critère commun. Les variables qualitatives ordinales conservent la hiérarchie de la distribution et les classes sont constituées sur la base des rangs.

Les variables quantitatives demandent de considérer 3 types d'information pour déterminer les méthodes de discrétisation à utiliser.

- **L'ordre de grandeur**, révélé par les valeurs centrales de la distribution (mode, moyenne ou médiane). Ces valeurs peuvent être utilisées comme limites des classes (voir la méthode Boxmap dans le tableau 7.3).
- **La dispersion**, qui est la mesure de la variabilité des valeurs d'une série statistique (écart-type, intervalle interquartiles).
- **La forme de la distribution** (normale, asymétrique, exponentielle, etc.) traduit le comportement d'un phénomène et permet de déterminer la méthode de mise en classe la plus adaptée. Le tableau 7.3 présente cinq méthodes de discrétisation standards.

La mise en classe est également régie par les règles suivantes:

- Les classes doivent couvrir l'ensemble de la distribution statistique et doivent être contiguës.
- Une valeur ne doit appartenir qu'à une seule classe
- Les classes ne peuvent pas être vides
- Le choix des valeurs limites doit reposer sur des critères robustes
- Des valeurs non significativement différentes ne doivent pas être placées dans des classes distinctes

7.4 Habillage et production de cartes thématiques

Un signal cartographique doit être accompagné d'un certain nombre de composantes d'habillage. Comme nous l'avons vu, certaines de ces composantes sont obligatoires lors de l'élaboration d'une carte tandis que d'autres seront utilisées selon le contexte de la carte. Une composante est jugée indispensable lorsque le but poursuivi par la carte et le contexte de sa publication implique son utilisation.

Les composantes communément admises comme obligatoires sont : Un titre et sous-titre, l'année de production des données statistiques et spatiales, la légende, l'échelle cartographique, l'orientation (par défaut le nord est en haut de la carte, les sources des données, le nom des auteurs et copyright, la date de fabrication de la carte.

7.4.1 Habillage d'une carte

L'habillage complète la carte et permet à l'utilisateur de mieux la comprendre. Une carte thématique ne devrait donc pas être présentée sans son contexte géographique. En effet, tout territoire représenté est contigu à d'autres régions. L'information contenue dans ces régions contiguës comme les cours d'eau, les lacs, les chaînes de montagnes, les grandes villes ou les axes routiers et ferroviaires majeurs améliorent le repérage spatial et permettent une meilleure compréhension des réalités des situations contextuelles du phénomène étudié comme la situation socio-économique par exemple.

7.4.2 Esthétique

L'**esthétique** des documents cartographiques repose sur trois principes fondamentaux.

1. L'harmonie est la relation entre les éléments de la carte. Elle permet de produire un signal homogène. Elle est l'équilibre visuel entre tous les éléments.
2. La composition est l'arrangement des éléments sur la carte. Elle est l'organisation et la hiérarchisation des composantes de la carte en fonction de leur valeur informative.
3. La clarté est la cohérence des choix des couleurs, la sobriété dans le choix des polices de caractères et l'optimisation de l'agencement des éléments de l'habillage dans l'espace disponible. Une clarté optimale aidera le lecteur dans le décodage du signal.

La phase de finalisation des aspects esthétique est souvent faite par une retouche dans un logiciel d'édition graphique.

8 Références

- ANSELIN, L. (1995), Local indicators of spatial association - LISA, *Geographical Analysis*, vol. n° 27, 1995, p. 93-115.
- ANSELIN, L. (1993). *Spatial data analysis with GIS: an introduction to application in the social sciences*, National Center for Geographic Information and Analysis, University of California, Santa Barbara.
- ANSOULT, M. (1988). *Etude et modélisation de formes de la surface terrestre*. Louvain-la-Neuve, PhD, Faculté des sciences agronomiques, Université catholique de Louvain, p. 105.
- ARNAUD M. et X. EMERY. (2000). *Estimation et interpolation spatiale: méthodes déterministes et méthodes géostatistiques*, Paris, Hermes Science Publications.
- BERTIN, J. (1970). LA GRAPHIQUE. COMMUNICATIONS, 15(1), 169–185.
[HTTPS://DOI.ORG/10.3406/COMM.1970.1221](https://doi.org/10.3406/comm.1970.1221)
- BRABANT, M. (2003). *Maîtriser la topographie*, Eyrolles, p. 552.
- BRUNET, R., FERRAS, R. et al. (1992). *Les mots de la géographie - dictionnaire critique*. Montpellier, Paris, GIP RECLUS, La Documentation française.
- ***BURROUGH, P. A. et R. A. MCDONNELL (1998). *Principles of Geographical Information Systems*. New York, Oxford University Press, p. 333.
- ***CALOZ R., et C. COLLET. (2001). *Traitements numériques d'images de télédétection - Précis de télédétection - Vol. 3*, Québec, Presses de l'Université du Québec/AUPELF, p. 392.
- CALOZ, R., & COLLET, C. (2011). ANALYSE SPATIALE DE L'INFORMATION GEOGRAPHIQUE. PPUR PRESSES POLYTECHNIQUES UNIVERSITAIRES ROMANDES, LAUSANNE
- CALOZ, R. (2005). Réflexions sur les incertitudes et sur leur propagation en analyse spatiale. *Revue internationale de Géomatique* 15/3, pp. 303-319.
- ***DIJKSTRA, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graph, *Numerische Mathematik* (1), pp. 269-271.
- DONNAY, J.-P. (1997). *Cartographie mathématique*. Liège, Laboratoires SURFACES, p. 270.
- ***EGENHOFFER, M. (1989). Spatial Query Language. PhD, Depart. of Surveying Engineering, University of Maine.
- GEARY, R. C. (1954). The contiguity ratio and statistical mapping, *The Incorporated Statistician*, vol. 5, n° 1954, pp. 115-145.
- GETIS, A. et ORD, J. K. (1992). The analysis of spatial association by use of distance statistics, *Geographical analysis* 24(3), pp. 189-206.
- GETIS, A., J. GETIS, et J.D. FELLMANN. (1981). *Geography - a Systematic Geography*, Macmillan Company, New York p. 500 (1^{re} édition, la 11^e a été publiée en 2008).
- ***GOODCHILD, M. (1992), Geographical Information Science, *International Journal of Geographical Information Science* 6(1), p. 31.

- HOWALD, P. (1994). *Topographie I*. Lausanne, Services des Polycopiés, EPFL, p. 161.
- JOOST, S., SOUTTER, M., SALL, A., & KOUAMÉ, F. (2017). SYSTÈMES D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE 1, EPFL PRESS, LAUSANNE (BOOC SIG 1)
- JOOST, S., SOUTTER, M., SALL, A., & KOUAMÉ, F. (2017). SYSTÈMES D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE 2, EPFL PRESS, LAUSANNE (BOOC SIG 2)
- MILLES, S. et J. LAGOFUN. (1999). *Topographie et topométrie moderne, volume 1 : Technique de mesure et de représentation*, Paris, Eyrolles, p. 526.
- ***MORAN, P. (1948). The interpretation on statistical maps, *Journal of Royal Statistical Society. Serie B (Methodological)*, vol. 10, n° 2.
- ***ORD, J.K. et A. GETIS. (1995). Local Spatial Autocorrelation Statistics: Distributional Issues and an Application. *Geographical Analysis* 27, pp. 286-306.
- SMITH, M. J., GOODCHILD, M. F *et al.* (2008). *Geospatial Analysis - a Comprehensive Guide*, Leicester, Matador, p. 516.
- WALLISER, B. (1977). *Systèmes et modèles - Introduction à l'analyse critique*, Paris, Seuil, p. 248
- ***ZEVENBERGEN, F. et C. THORNE. (1987). Quantitative analysis of land surface topography, *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. n° 12, p. 47.