



**De l'aménagement numérique des territoires à
l'intégration du Web dans l'analyse géographique :
nouvelles méthodes et perspectives pour les Systèmes
d'Information Géographiques (SIG), la cartographie et
la télédétection**

Hiba Alawad

► **To cite this version:**

Hiba Alawad. De l'aménagement numérique des territoires à l'intégration du Web dans l'analyse géographique : nouvelles méthodes et perspectives pour les Systèmes d'Information Géographiques (SIG), la cartographie et la télédétection. Autre. Université d'Avignon; Ġāmi'at Dimašq, 2010. Français. NNT : 2010AVIG1086 . tel-00569413

HAL Id: tel-00569413

<https://theses.hal.science/tel-00569413>

Submitted on 25 Feb 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

pour obtenir le grade de Docteur en Sciences Humaines et Sociales
SPECIALITE : Géographie

École Doctorale 355 « Sciences Humaines et Sociales »



présentée par

Hiba Alawad

De l'aménagement numérique des territoires à l'intégration du Web dans l'analyse géographique

**Nouvelles méthodes et perspectives
pour les Systèmes d'Information Géographiques (SIG),
la cartographie et la télédétection**

Soutenue publiquement le 8 novembre 2010 devant le Jury composé de :

M. François MORICONI-EBRARD, DR-CNRS, SEDET, Université Paris 7-Diderot

Rapporteur

M. Gilles PUEL, MCF - HDR, Université de Toulouse 2

Rapporteur

Mme Agnès BÉGUÉ, CR-CIRAD - HDR, UMR-TETIS, Montpellier

Examineur

Mme Catherine MERING, PU, Université Paris 7-Diderot

Examineur

M. Loïc GRASLAND, PU, Université d'Avignon

Directeur de thèse

REMERCIEMENTS	5
INTRODUCTION GENERALE	7
PARTIE 1	
INEGALITES TERRITORIALES NUMERIQUES ET REDUCTION DE LA FRACTURE NUMERIQUE	19
INTRODUCTION DE LA PREMIERE PARTIE	21
1. CHAPITRE 1	
LES DIMENSIONS GEOGRAPHIQUES DES TECHNOLOGIES D'INFORMATION ET DE LA COMMUNICATION (TIC)	22
INTRODUCTION	23
1.1. <i>LES TIC ET L'ESPACE GEOGRAPHIQUE</i>	24
1.2. <i>INTERNET EST UN RESEAU DE TRANSPORT D'INFORMATIONS NUMERIQUES</i>	26
1.3. <i>LES TIC COMME ELEMENT DE DEVELOPPEMENT DURABLE</i>	29
1.4. <i>UNE NOUVELLE CONCEPTION DES RELATIONS ENTRE TELECOMMUNICATIONS ET TERRITOIRE</i>	31
1.5. <i>LE RESEAU INTERNET PEUT-IL ANNULER L'EFFET DE LA DIMENSION SPATIALE ?</i>	32
1.6. <i>LE RESEAU INTERNET SUPPRIME LES FRONTIERES NATIONALES (UN RESEAU MONDIAL)</i>	34
1.7. <i>LES DIFFERENCIATIONS REGIONALES DE DEVELOPPEMENT NUMERIQUE : ETUDE SUR LE BASSIN MEDITERRANEEN</i>	38
1.8. <i>LE HAUT DEBIT EN FRANCE</i>	38
CONCLUSION	43
2. CHAPITRE 2	
INEGALITES SPATIALES DANS LA DESSERTE D'INTERNET ET DANS LES MODES DE CONNEXION EN FRANCE	44
INTRODUCTION	45
2.1. <i>INEGALITES TERRITORIALES DE REPARTITION DES RESEAUX DE TELECOMMUNICATION EN FRANCE</i>	46
2.2. <i>LA COUVERTURE DU MILIEU RURAL PAR LE HAUT DEBIT (FRANCE)</i>	48
2.3. <i>DESSERTE A HAUT DEBIT AU SEIN D'UN DEPARTEMENT FRANÇAIS (LA DROME)</i>	52
2.4. <i>MODES DE CONNEXION A INTERNET</i>	56
2.5. <i>LES USAGES D'INTERNET</i>	73
2.6. <i>LE HAUT DEBIT, POUR QUOI FAIRE?</i>	77
CONCLUSION	79
3. CHAPITRE 3	
CHOIX D'UNE COMMUNE D'ETUDE ET ANALYSE DES TECHNOLOGIES DE DESSERTE CORRESPONDANTES	80
INTRODUCTION	81
3.1. <i>CHOIX DE LA COMMUNE DE DESSERTE</i>	82
3.2. <i>LE WI-FI COMME CHOIX DE LA TECHNOLOGIE DE DESSERTE</i>	89
3.3. <i>LE CHOIX DU POINT D'ACCES (AP)</i>	94
CONCLUSION	100
4. CHAPITRE 4	
SCENARIOS DE DESSERTE PAR LA TECHNOLOGIE WI-FI ET METHODE D'ESTIMATION DE LA POPULATION A DESSERVIR	101
INTRODUCTION	102
4.1. <i>LES DONNEES DANS LES BASES IGN</i>	103
4.2. <i>CHOIX DES MODELES DE DONNEES RASTER ET VECTEUR</i>	104
4.3. <i>LE PRINCIPE D'ANALYSE DU CHAMP DE VISIBILITE</i>	105
4.4. <i>LES PROJECTIONS</i>	105
4.5. <i>UN MNT COMPATIBLE POUR L'ANALYSE DU CHAMP DE VISIBILITE</i>	105
4.6. <i>STRATEGIE D'IMPLANTATION D'UN POINT D'ACCES (AP)</i>	108
4.7. <i>TROIS SCENARIOS D'ETUDE POUR INSTALLER L'AP</i>	109
4.8. <i>METHODE D'ESTIMATION DE LA POPULATION COMMUNALE A PARTIR DU BATI</i>	116
CONCLUSION	121
5. ELEMENTS DE REFLEXION ET PISTES DE RECHERCHE	122

6. CONCLUSION DE LA PARTIE 1	128
PARTIE 2	
ANALYSE DU BATI A L'AIDE DES TIC (<i>GOOGLE EARTH</i>)	
POUR LA REDUCTION DE LA FRACTURE NUMERIQUE	135
INTRODUCTION DE LA DEUXIEME PARTIE	137
1. CHAPITRE 1	
TELEDETECTION ET INTERPRETATION DES IMAGES NUMERIQUES	141
INTRODUCTION	142
1.1. <i>NOTIONS FONDAMENTALES DE TELEDETECTION</i>	143
1.2. <i>LA PHOTO-INTERPRETATION : VISION ET CONTRASTE</i>	151
1.3. <i>LES EFFETS PERTURBATEURS SE MANIFESTANT SUR L'IMAGE BRUTE</i>	157
1.4. <i>STRUCTURE ET CARACTERISTIQUES DE L'INFORMATION DANS L'IMAGE NUMERIQUE</i>	164
CONCLUSION	177
2. CHAPITRE 2	
L'ANALYSE D'IMAGES ISSUES DE <i>GOOGLE EARTH</i> : EVALUATION ET PERTINENCE POUR LA DETECTION DE L'ETALEMENT URBAIN	178
INTRODUCTION	179
2.1. <i>VISUALISATION ET EXPLOITATION DE NOUVELLES SOURCES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE</i>	180
2.2. <i>MODES DE REPRESENTATION DES DONNEES SPATIALES EN GEOGRAPHIE</i>	181
2.3. <i>LES IMAGES <i>GOOGLE EARTH</i></i>	182
2.4. <i>DETECTION DE CHANGEMENTS ENTRE DES IMAGES <i>GOOGLE EARTH</i> A DEUX DATES DIFFERENTES</i>	186
2.5. <i>LES NOTIONS A PRENDRE EN COMPTE DANS LA PROCEDURE D'EXTRACTION DU BATI DANS LES IMAGES NUMERIQUES</i>	188
CONCLUSION	197
3. CHAPITRE 3	
LES METHODES D'EXTRACTION DU BATI PAR TELEDETECTION A PARTIR DES IMAGES <i>GOOGLE EARTH</i>	198
INTRODUCTION	199
3.1. <i>DEMARCHE LOGIQUE D'EXTRACTION D'UN OBJET</i>	200
3.2. <i>PROBLEMES RENCONTRES DANS UN TEL TYPE D'ANALYSE</i>	217
3.3. <i>EFFET D'ECHELLES ET PERCEPTION DE LA CIBLE</i>	218
3.4. <i>QUALITE COMPAREE D'UNE EXTRACTION DE SIGNATURE SPECTRALE PAR DEUX LOGICIELS</i>	220
CONCLUSION	225
4. CHAPITRE 4	
VERS UNE NOUVELLE APPROCHE METHODOLOGIQUE D'EXTRACTION DU BATI A L'AIDE D'UN SIG : INTERETS ET LIMITES	226
INTRODUCTION	227
4.1. <i>LES ETAPES D'EXTRACTION DES ELEMENTS BATIS</i>	227
4.2. <i>CARTOGRAPHIE DU RESULTAT FINAL DE L'EXTRACTION</i>	234
4.3. <i>EXEMPLE D'APPLICATION NATIONALE SUR UNE COMMUNE DROMOISE : <i>LIVRON-SUR-DROME</i></i>	234
4.4. <i>EXEMPLE D'APPLICATION INTERNATIONALE SUR UNE COMMUNE SYRIENNE : <i>DIER-EL-ZOR</i></i>	236
CONCLUSION	238
5. ELEMENTS DE REFLEXION ET PISTES DE RECHERCHE	239
6. CONCLUSION DE LA PARTIE 2	244
CONCLUSION GENERALE	249
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	255
TABLE DES FIGURES ET TABLE DES MATIERES	269

Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord mon directeur de thèse, Loïc Grasland qui a guidé ce travail, apportant des critiques toujours pertinentes et proposant de nouvelles idées de recherche. Je le remercie également pour tous les moments où il m'a soutenu dans les périodes difficiles de mes 4 années de thèse. Merci d'avoir consacré ces dernières semaines à la relecture et à la correction de mon texte.

Je tiens à remercier mon pays (la Syrie) pour avoir financé mes études en France pendant ces 4 années de bourse. Je remercie également la France de m'avoir accueillie dans un cadre scientifique agréable à l'Université d'Avignon, en particulier au sein de l'équipe de l'UMR 6012-ESPACE du CNRS.

Merci aux membres du jury, Catherine Mering, Agnès Bégué, François Moriconi-Ebrard et Gilles Puel d'avoir accepté d'évaluer ce travail de thèse en dépit d'emplois du temps chargés.

Merci à l'ensemble des Maîtres de Conférences et Professeurs, Loïc Grasland, Johnny Douvinet, Mounir Redjimi, Cyrille Genre-Grandpierre, Alain Richaud, Philippe Ellerkamp, Janine Lemaire, Philippe Martin, Didier Josselin, Lahouari Kaddouri, Cécile Helle.

Merci à tous mes collègues qui m'ont accompagnée dans ces années de travail, en particulier mes amis Nathalie Brachet et Johnny Douvinet pour m'avoir soutenu dans tous les instants. Je les remercie profondément aussi pour les bons moments de décompression absolue.

Merci à l'ensemble de mes (ex !) collègues-doctorants : Safouk Alkalifa, Ruba Nasri, Ilien Mahfoud, Elodie Castex, Sylvain Saunier, Maxime Forriez, Laure Casanova. Je souhaite bon courage aux nouveaux doctorants : Adrien Lammoglia, Julie Prud'homme, Igor Catalao.

Merci à tous mes amis pour les bons moments de détente pendant lesquels j'ai pu « recharger à plusieurs reprises les batteries » : Nathalie Brachet, Johnny Douvinet, Rachel et Stéphane Lequoy, Michel Guerin, Pascale Di Domenico, Christine Gatellier, Marion Tillous, Cédric Coulomb, Nathalie Dugnas, Jean François Blanco, Alexia Bouffel, Cathie Boubila et Olivier Sastre.

Merci du fond du cœur à Adrien Césarini et Marjorie Ambrosio pour leur patience avec Karam, et je n'oublie pas évidemment mon amie Janis Peruzzi.

Je tiens à remercier profondément M. et Mme Gallois, pour leur grand cœur et leur disponibilité...

Un grand merci également à mes parents : ma mère Najah et mon père Yahiya, mes frères Mohamed et Ahmed, pour leur soutien psychologique malgré la distance.

Merci à ma mère pour sa patience, son existence, son soutien à chaque instant et sa force à dépasser les moments de grande tristesse. Tu me donnes toujours de la force pendant les moments difficiles. Merci !

Enfin, un merci infini à toi, mon petit canard, mon enfant **Karam**. Ton existence me donne toujours une raison pour avancer; ton magnifique sourire me redonne du moral à chaque instant, m'aidant dans les moments de découragement. Merci mon trésor !!!



À mon père et mon frère, partis trop tôt...

INTRODUCTION GENERALE

Le nombre d'utilisateurs Internet s'élève aujourd'hui dans le monde à 1800 millions en 2010 (IWS¹, 2010). Indéniablement, le monde d'Internet a progressé en quelques années. Il suscite de nouvelles approches de l'information et de la communication qui touchent à l'organisation des hommes en société, mais aussi plus spécialement, aux structures économiques, sociales, culturelles et politiques (Rolland-May et Lebahar, 2004). Cette « révolution informationnelle » concerne toute la société, tous les acteurs et toutes les échelles d'observation.

Mais cette révolution ne touche pas tous les territoires de la même manière. L'inégalité de répartition des services de télécommunication peut être perçue comme une véritable fracture numérique qui a des causes sociales, économiques ou politiques (Dupuy, 2002). Cette inégalité dans la communication apparaît comme une discontinuité géographique qui divise l'espace en deux grandes catégories : l'espace connecté et l'espace non connecté. De ce point de vue, la fracture numérique relève d'une problématique de distribution inégale de ressources numériques dans l'espace géographique. Cette notion peut être affinée car elle recouvre en réalité différents aspects (Valenduc, 2006). A titre d'exemple, le tableau suivant propose huit angles différents permettant de rendre compte de la notion de fracture numérique (figure 1).

<i>L'âge</i>	<i>Le genre</i>	<i>Les revenus</i>	<i>Le niveau de formation</i>
La proportion d'utilisateurs réguliers diminue avec l'âge, mais les seniors sont de plus en plus nombreux à se socialiser via internet et les préretraités viennent gonfler les rangs.	Les disparités entre hommes et femmes persistent, mais elles s'atténuent lorsque la diffusion d'internet se généralise (Finlande, Danemark, Pays-Bas, Amérique du Nord)	Il existe une relation quasi linéaire entre le niveau de revenu et le taux d'utilisation régulière d'internet ; cette inégalité persiste dans les pays où internet atteint une diffusion plus large.	Ici aussi, il existe une relation directe entre le niveau de formation et l'usage d'internet, mais certains efforts ciblés d'éducation permanente peuvent réduire les écarts de manière significative.
<i>Les professions</i>	<i>La composition familiale</i>	<i>Les caractéristiques régionales</i>	<i>Nord Sud</i>
La prédominance des professions intellectuelles et des étudiants persiste, mais internet fait une percée significative parmi les travailleurs manuels et les demandeurs d'emploi.	Les familles biparentales ayant des enfants en âge scolaire sont les plus nombreuses à utiliser internet. Les isolés et les femmes seules avec enfants font partie des groupes défavorisés.	Partout en Europe, les disparités régionales sont liées aux écarts de développement économique. Par contre, il y a peu de différences entre zones urbaines et rurales.	Au niveau mondial, la fracture numérique prend l'allure d'une crevasse. Les écarts entre pays du Sud sont encore plus profonds qu'entre le Nord et le Sud, mais la créativité des usages y est étonnante.

Source : Vendramin P., Valenduc G., *La Lettre EMERIT* n° 39, Namur, juin 2004

Figure 1 : La fracture numérique sous huit angles de vue

¹ *Internet World Stat.*

Les deux angles de vue basés sur les *caractéristiques régionales* et les rapports *Nord/Sud* recouvrent des dimensions géographiques caractéristiques à plusieurs échelles. Les *caractéristiques régionales* seront plus particulièrement explorées dans cette thèse.

La fracture numérique se résorbera-t-elle d'elle-même ou ses contours évolueront-ils au cours du temps, ce qui la pérenniserait ? Selon la théorie classique de la diffusion des innovations, la fracture numérique est perçue comme un phénomène transitoire, donc amené à disparaître progressivement, au fur et à mesure que la diffusion d'Internet s'approche de la saturation (Vernon, 1966) (figure 2).

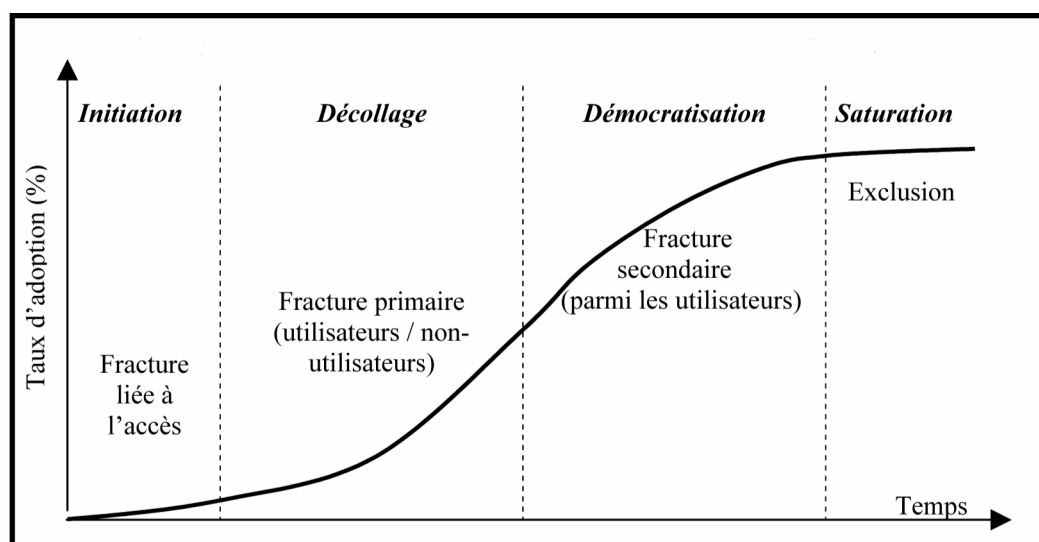


Figure 2 : Processus de diffusion de l'accès à Internet et nature de la fracture numérique au cours du temps (Valenduc, 2004).

Plusieurs critiques ont été adressées à cette théorie, du fait de l'apparition et de la superposition d'une fracture secondaire (liée aux usages) à une fracture primaire (liée aux infrastructures) (Valenduc, 2006).

Dans cette thèse, l'exclusion de l'accès à Internet (*Figure 2*) est envisagée dans ses dimensions géographiques uniquement du point de vue de la fracture numérique primaire. L'approche géographique vient de l'observation d'une diffusion spatiale inégale. Cette diffusion pose des problèmes d'inégalités spatiales et territoriales d'accès à Internet à toutes les échelles, qu'elles soient mondiales, nationales, régionales ou locales (Grasland, 2004). A cette distribution spatiale inégale s'ajoutent aussi celle des services accessibles par les TIC et même celle d'activités (Dupuy, 2002). La cartographie de ces phénomènes spatiaux permet de représenter les configurations spatiales de l'accès à Internet. Bien que peu visibles, ces

dernières révèlent-elles différentes formes spatiales de diffusion et relèvent-t-elles de logiques géographiques ?

Répondre à ces questions nécessite au préalable que soient posées les hypothèses suivantes : l'« *espace de la couverture Internet* » est un espace géographique ; il génère une configuration géographique bien identifiable, même s'il comporte de fortes ruptures ou des discontinuités. Une partie des discontinuités des réseaux de télécommunication peut être traitée par un mode de desserte non filaire. De ce point de vue, il apparaît intéressant de connaître le fonctionnement de chaque mode de desserte, filaire et non-filaire, tout en explorant les technologies correspondantes.

La connaissance des caractéristiques techniques de chaque technologie permet d'évaluer la plus adaptée, techniquement et économiquement, à un espace donné. Par exemple, les technologies varient selon les distances à couvrir pour la desserte à haut débit. Elles varient aussi selon les niveaux de densité démographique et d'activités économiques, ou encore selon les caractéristiques géographiques (figure 3).

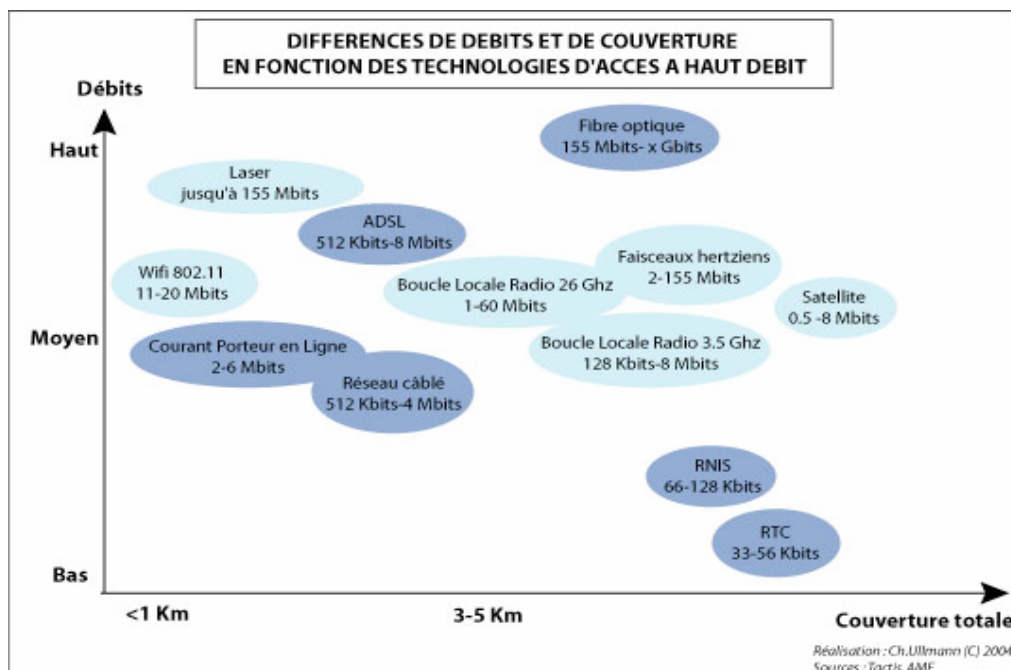


Figure 3. Technologies d'accès au haut débit et couverture géographique (Tactis, 2006)

L'objectif général de cette thèse est de savoir comment l'accès à Internet peut être généralisé et comment en tirer un service mondial, sans discontinuités géographiques. Le but

est de créer, avec les technologies d'accès à Internet, un espace de communication ouvert et accessible à tout le monde, et ainsi réduire la dichotomie entre les espaces privilégiés (ayant accès à ces services) et les autres espaces sans service.

Comme l'écrit Bakis (2010), « *Il s'agit de réfléchir sur la fragmentation des territoires et la différenciation de l'espace dans le contexte de la mondialisation. Celle-ci nous conduit-elle vers un monde homogène ? Limites et discontinuités sont-elles en train de disparaître ?* ».

La première partie de la thèse fait un état des lieux de la diffusion d'Internet et pose le problème de la fracture numérique à différentes échelles spatiales : mondiale, méditerranéenne, nationale (France) puis départementale (Drôme). « *Désormais la tendance est d'intégrer quasi-systématiquement les Technologies de l'Information et de la Communication (TIC) dans les routines de l'activité humaine ainsi que dans les stratégies de développement mises en œuvre à l'échelle nationale comme à l'échelle locale* » (Loukou, 2009).

Les inégalités de territoire apparaissent à toutes les échelles géographiques, mais nous proposons des solutions pour les résorber d'abord à l'échelle locale. La résorption de ces inégalités à une échelle locale permet par ailleurs de résoudre une grande partie des inégalités d'accès aux autres échelles spatiales.

En examinant la fracture numérique à une échelle fine (échelle communale), l'objectif est d'identifier les types de zones blanches - les zones pas ou mal desservies par Internet à haut débit - et d'envisager la manière dont elles pourraient être équipées par des technologies adaptées (Fautrero, 2006).

L'intérêt de prendre en compte la fracture primaire est de considérer les évolutions technologiques. A titre d'exemple, si l'absence d'une couverture suffisante du réseau en matière de téléphonie fixe limite l'accès des pays en voie de développement à Internet, la multiplication des autres supports pourrait leur offrir des perspectives moins contraignantes (Ben Youssef, 2004).

La première partie de la thèse propose également une méthode de desserte d'un espace géographique par le haut débit via un réseau horizontal : le Wi-Fi. L'avantage de la desserte par la technologie non-filaire est qu'elle peut être envisagée dans le cas de difficultés géographiques (obstacles naturels, zones accidentées, faible peuplement,...) et d'éviter ainsi

des travaux de génie civil trop coûteux pour installer un réseau filaire, ou des difficultés économiques qui ne justifient pas d'utiliser la technologie filaire. Par comparaison aux réseaux filaires, les réseaux sans fil offrent trois atouts essentiels :

- désengorger les réseaux d'accès et les connexions des utilisateurs souvent sous-dimensionnées et à l'origine de la lenteur ou des ruptures de services ;
- désenclaver les zones isolées ayant une densité de population faible ou moyenne, espaces qui sont peu rentables pour les opérateurs de réseaux filaires ;
- desservir des zones géographiquement difficiles d'accès à cause du coût exorbitant et de la pénibilité particulière des travaux de génie civil sur ce type de sites (Agba, 2004), comme par exemple les espaces montagneux.

D'après France Télécom (2009), une étude réalisée sur le taux d'éligibilité² de la ligne téléphonique par commune du département de la Drôme montre que 15,2 % des communes drômoises (56 communes) ont un taux d'éligibilité inférieur à 50%. La cause de cette discontinuité de service et de l'existence de zones dites « blanches » est que *« l'opérateur historique comme les opérateurs alternatifs, soumis à des impératifs financiers, n'envisagent pas de couvrir les territoires jugés non rentables (les communes rurales et les quartiers éloignés des répartiteurs téléphoniques) »* (Fautrero, 2006).

A cet égard, une étude démographique a été réalisée sur l'ensemble des communes du département de la Drôme, en particulier sur les communes rurales drômoises. Celle-ci permet de mieux comprendre les tendances de leur évolution démographique entre deux périodes intercensitaires selon l'INSEE³. D'un point de vue économique, la prise en compte de cette évolution démographique constitue une vision prédictive, permettant d'envisager le marché à desservir en priorité, à moyen et long terme, et d'ouvrir le champ de concurrence entre les fournisseurs d'accès intéressés. Dans ce contexte, une étude démographique a été envisagée pour sélectionner les communes à desservir en priorité par Internet et en particulier par le Haut Débit, voire le Très Haut Débit (THD).

² Le taux d'éligibilité est un bon indicateur pour mesurer la diffusion de haut débit dans un espace donné. En effet, celui-ci évalue le rapport entre le nombre de lignes pouvant accéder à au moins une offre haut débit de France Télécom et le nombre total de lignes sur la zone considérée.

³ Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques.

Une étude plus fine a été menée sur la commune de La Roche-sur-le-Buis (26). Ce choix se justifie par le fait que cette commune a connu une croissance démographique continue, passant de 134 à 307 habitants entre 1968 et 2007 (selon les chiffres de l'INSEE). De fait, elle possède un marché en pleine croissance du point de vue des opérateurs⁴.

L'analyse géographique a été prise en compte sous deux angles. Le premier a été de définir le lieu d'implantation d'un point d'accès principal afin de déployer le Wi-Fi soit en utilisant les infrastructures existantes, soit en créant une nouvelle infrastructure pour diffuser ces ondes hertziennes. Une analyse spatiale menée à partir d'un SIG permet de choisir la localisation pertinente et stratégique du point d'accès principal (AP) avec implantation d'une antenne Wi-Fi au sein de l'espace étudié pour assurer la couverture par le réseau. Trois scénarii sont présentés pour couvrir l'espace par les ondes Wi-Fi à partir d'une méthode d'analyse de visualisation de l'espace, appelée analyse des champs de visibilité. Les trois scénarii sont valables d'un point de vue géographique, mais, pour le choix de leur mise en œuvre, la décision finale pourra également relever d'arguments politiques et économiques.

Le deuxième angle de cette thèse touche à l'aspect économique. L'étude consiste à envisager le nombre d'utilisateurs de ce réseau hertzien Wi-Fi. « *Dans les zones denses qui sont définies comme les communes à forte concentration de population, pour lesquelles, sur une partie significative de leur territoire, il est économiquement viable pour plusieurs opérateurs de déployer leurs propres infrastructures, en l'occurrence leurs réseaux, au plus près des logements. Dans la majorité de ces zones, les principaux acteurs du marché ont préparé ou engagé des déploiements* » (ARCEP, 2010). La méthode consiste à estimer le nombre d'habitants à partir des données spatiales du bâti de l'IGN⁵ et la surface moyenne par personne selon le type d'agglomération défini par l'INSEE.

Le principe de fonctionnement du mode non filaire, le Wi-Fi ou le Wimax, est assez similaire, la différence étant le rayon de la zone de desserte. La technologie Wimax peut desservir une zone plus vaste qu'en mode Wi-Fi (ARIASE⁶, 2010). La visibilité du point d'accès Wi-Fi à partir des bâtiments concernés est une condition indispensable d'accès au réseau.

⁴ De fait, d'après l'IDATE (*Institut de Développement de l'Audiovisuel et des Télécommunications en Europe*) en juin 2007, La Roche-sur-le-Buis a été sélectionnée comme un espace à desservir à l'aide de la technologie de Wi-Fi.

⁵ Institut Géographique National.

⁶ ARIASE : site web qui permet de tester les possibilités d'offre ADSL et de comparer les offres d'opérateurs.

La visibilité est analysée à partir de données du bâti de l'IGN qui sont ensuite intégrées et traitées dans un SIG⁷. En raison de leur absence ou de leur coût, le manque de données topographiques peut constituer un obstacle important à la réalisation d'une égalité territoriale dans l'accès aux services numériques. Comme l'objectif général de cette thèse est de remédier aux discontinuités spatiales du réseau Internet haut débit, nous proposons une méthode qui permet de contourner cet obstacle par une solution dérivée des TIC⁸ mêmes.

Les TIC présentent en effet des solutions à partir de sites Web qui présentent des univers géographiques virtuels. Ceux-ci permettent d'accéder aux sources des données en accès libre et donnent la possibilité de télécharger des logiciels dits de « géo-management » comme *Google Earth* : « *Un des types d'objets néogéographiques⁹ les plus remarquables est sans aucun doute constitué par les terres virtuelles dont la plus connue est Google Earth* » (Desbois, 2009). « *Ces outils, on le sait, permettent des repérages sur le terrain et des analyses d'espaces géographiques et de paysages de plus en plus détaillés. Ils sont depuis longtemps les outils du géographe dans l'inventaire des formes et des structures spatiales de la surface du globe. Mais ils servent aussi à bien d'autres sciences, chaque fois qu'elles veulent prendre en compte la dimension spatiale des phénomènes qu'elles observent* » (Courtot, 2008).

Les chercheurs sont souvent à la recherche de sources d'informations, de données qui peuvent répondre à leurs besoins (Voiron, 1995), ce qui n'exclut pas quelques dérives comme l'indique Desbois (2009) : « *Un certain nombre de chercheurs ont ainsi tendance à orienter leurs recherches en fonction des données disponibles et de l'emploi qu'ils peuvent faire de l'outil informatique sans se préoccuper des biais éventuels introduits par la façon dont sont constituées les données* ». L'existence de ces données est indispensable pour les géographes, mais nécessite de porter une grande attention à leur qualité. Une façon d'être sûr de cette qualité consiste aussi à en acquérir de nouvelles, en contrôlant les paramètres de leur collecte. C'est le cas par exemple des données acquises par télédétection. « *Au tournant de l'an 2000, le transfert des technologies de la télédétection militaire vers les applications civiles donne*

⁷ Système d'Informations Géographique.

⁸ Technologies d'Information et de la Communication.

⁹ Depuis environ deux ans, l'emploi du terme *néogéographie* se répand pour désigner le phénomène de l'extraordinaire développement des techniques de la géographie numérique dans la vie quotidienne. Le mot a, dans ce sens précis semble-t-il, été employé pour la première fois en 2006, par Di-Ann Eisnor, cofondatrice du site *Platial*, sorte d'atlas urbain collaboratif. Elle définit la *néogéographie* comme « *un ensemble de pratiques variées qui se déroulent en dehors, à côté, ou à la façon des pratiques de géographes professionnels* » (Hudson-Smith et Crooks, 2008).

naissance à des satellites d'observation de la Terre à très haute résolution. Les images de télédétection destinées à l'observation fine de la surface terrestre, y compris les photographies aériennes traditionnelles, sont, sous forme numérique, intégrées aux Systèmes d'Information Géographique » (Kergomard, 2004). La cartographie de ces données à l'aide des SIG permet de rendre compte de la configuration des phénomènes spatiaux et de mettre en évidence leurs structures spatiales (Robin, 2002). Elle permet de mieux lire, comprendre et envisager les phénomènes de répartition spatiale et même leurs évolutions dans le temps. *« Google Earth et d'autres applications similaires possèdent un certain nombre de caractéristiques qui les différencient radicalement de la cartographie traditionnelle. Par exemple, l'imagerie spatiale, la photographie, et la cartographie à proprement parler sont totalement intégrées, si bien que les différences fondamentales de nature entre les différents médias deviennent imperceptibles »* (Desbois, 2009).

La deuxième partie de la thèse porte précisément sur la recherche de solutions pour construire des bases des données spatiales en s'aidant des techniques de la télédétection et des images satellitaires en accès libre comme sur *Google Earth*. Ces images numériques sont des sources riches d'informations thématiques spatiales. Avec ses techniques, la télédétection constitue un moyen important pour extraire, traiter et analyser des photos numériques (Weber, 2007). Les analyses de la première partie de la thèse sont spécifiquement basées sur les données de *BD Topo* de l'IGN. La constitution de bases de données est l'objectif de la deuxième partie de la thèse. Cette partie présente un état des connaissances d'extraction de données du bâti à l'aide d'un logiciel de traitement d'images et une nouvelle méthode issue d'un logiciel SIG qui sera testée à plusieurs échelles selon les buts recherchés. L'utilisation de *Google Earth* comme source d'images permet de choisir des exemples d'application dans le monde entier. Les images retenues dans cette thèse portent sur des sites en France et en Syrie. Malgré le grand choix d'images proposées par *Google Earth* et celui des méthodes d'extraction basées sur des techniques de photos interprétation assistées par ordinateur (PIAO), il ne faut pas négliger la connaissance géographique préalable des phénomènes provisoirement identifiés sur les images (Afidegnon, 1998).

Le recours à la technique de Photo-Interprétation Assistée par Ordinateur (PIAO) est limité par la qualité spectrale des images numériques. Une bonne qualité repose sur une bonne résolution d'image et permet d'aborder plusieurs thèmes. La bonne résolution spatiale est une notion relative qui dépend de l'échelle, du thème et du but de l'extraction (Robin, 2002). De façon pratique, elle permet d'extraire ce que l'on attend de l'image. *« Pour une problématique*

donnée, il faut rechercher la bonne résolution qui n'est pas nécessairement la plus fine » (Labbé, 2006). La qualité de l'image est variable d'un espace géographique à l'autre, en fonction de la source ou de plusieurs paramètres du capteur d'image. Ces paramètres sont techniques ou temporels ou les deux ensemble.

L'utilisation d'un logiciel de visualisation d'images en accès libre (*Google Earth*), comme source d'images numériques, permet de travailler les espaces hors connexion Internet, après avoir récupéré des images par Internet, et en particulier par le haut débit. Pour pouvoir accéder à ce logiciel libre, il est cependant indispensable d'avoir un accès Internet haut débit.

La réalisation de la première partie est conditionnée par l'existence de données spatiales spécifiques. L'avantage d'avoir un producteur de données comme l'IGN dans un pays développé comme la France, malgré le prix élevé de ses données, est considéré comme un privilège qui n'existe pas dans beaucoup d'autres pays. Dans ce contexte, la démarche idéale serait de coupler l'existence d'une source d'images ouverte comme *Google Earth*, avec une méthode d'analyse également ouverte. Cette combinaison technique permettrait de construire les bases des données spatiales souhaitables pour réaliser des projets de desserte par les TIC, ou plus généralement pour des projets d'aménagement.

PARTIE 1

Inégalités territoriales numériques et réduction de la fracture numérique

Introduction de la première partie

L'objectif de cette première partie est de dresser un état de l'art du phénomène de fracture numérique, avant de procéder à une exploration des solutions possibles. L'exploration de cette fracture se fait sur le niveau 1, c'est-à-dire sur les insuffisances et les discontinuités de réseaux d'infrastructures de TIC.

Le premier chapitre présente les dimensions spatiales de cette fracture. Les inégalités de diffusion d'équipements sont observées à différentes échelles spatiales : au niveau mondial, national, régional et local. L'examen du niveau national est exposé dans un deuxième chapitre, en effectuant un état des lieux qui tient compte d'une distinction entre technologies filaires et non-filaires pour la connexion Internet.

Les choix de lieu et de technologie correspondante dépendent aussi de paramètres économiques qui sont exposés dans le troisième chapitre. Les stratégies basées sur des considérations économiques permettent de proposer finalement plusieurs scénarii de desserte en fonction d'une méthode d'estimation du nombre de bénéficiaires et feront l'objet du dernier chapitre de cette partie.

CHAPITRE 1

Les dimensions géographiques des Technologies d'Information et de la Communication (TIC)

Introduction

Ce chapitre 1 présente plusieurs axes de réflexion qui justifient l’utilisation des TIC dans le domaine d’étude de la géographie. Le premier axe analyse les TIC comme un ensemble de ressources d’un point de vue géographique. Autrement dit, l’intérêt est de comprendre les aspects géographiques des TIC. La question posée ici est de savoir en quoi les TIC peuvent être un objet d’analyse géographique. Le deuxième axe cherche à étudier la ressemblance entre les réseaux de transport et les réseaux de télécommunication. L’analyse des TIC, perçus comme des éléments de soutien au développement durable des activités économiques, constitue un troisième axe dans ce chapitre. La dimension internationale de répartition de réseaux de la communication et leur tendance géographique sont analysées dans le quatrième axe. Ces deux derniers axes permettent de faire un bilan sur la situation actuelle de la diffusion d’Internet et soulignent l’émergence de l’inégalité numérique à différentes échelles spatiales : mondiale, méditerranée, nationale (France).

1.1. *Les TIC et l'espace géographique*

Le nombre d'utilisateurs d'Internet a connu pendant ces 10 dernières années 400% de progression au niveau mondial. Ce phénomène de diffusion participe largement à la révolution dite « de l'information ». Il peut également être considéré comme une révolution géographique du point de vue de son déploiement spatial. Les régions, les pays, les villes, les campagnes, les frontières, les déserts, etc., tous les lieux géographiques sont accessibles à partir de sites Internet spécifiques.

« La profusion d'expressions comme économie numérique, urbanité numérique, territoire numérique, société numérique, écriture numérique, législation numérique, aménagement numérique... peut-être interprétée comme la marque d'une diffusion massive qui touche individus, entreprises et institutions : celles des Technologies d'Information et de la Communication (TIC) » (Rallet, 2003).

Beaucoup de sciences humaines ont étudié ces termes qui accompagnent l'adjectif « numérique » par un éclairage particulier : économique, juridique, sociologique, linguistique, etc. L'éclairage géographique reste cependant rare (Rallet, 2003).

Pour le chercheur travaillant dans le domaine de la géographie, le champ de l'information et de la communication est avant tout un champ constitué d'outils concrets qu'il s'approprie pour produire des données, interpréter l'espace et communiquer dans les territoires. Les nouveaux outils interactifs modifient sans relâche les apprentissages cartographiques. Le centre de ses préoccupations devient alors infographique. Comment les TIC permettent-elles de produire des données sociales spatialisées (SIG ...) ? *« Le corps social des géographes est investi par le progrès technique d'un triple point de vue : dans ses savoir-faire, dans son aptitude à produire du territoire en représentant un espace auquel il donne sens, dans ses pratiques médiatiques enfin » (Cassé, 1995)¹⁰.*

Deux approches ayant recours au TIC ont plus spécifiquement retenu l'attention des chercheurs : celle qui a été développée par les économistes, donnant le ton à bon nombre de travaux extérieurs à la discipline ; celle des géographes qui intègre la dimension spatiale à l'analyse du déploiement des TIC.

¹⁰ Encyclopédie de Géographie, chapitre (55).

Les économistes se sont penchés sur la localisation des entreprises du secteur TIC, le rôle des infrastructures de télécommunications dans le développement local, l'intensité d'adoption et d'utilisation des TIC selon les lieux, l'extension de la coordination à distance dans ou entre les entreprises et les effets de polarisation ou de dispersion engendrés (Grasland, 2004). Outre ces approches variées, « *ce jeu d'inclusions et de contournements* » (Bernard, 2003), que des auteurs ont essayé de développer, « *les géographes se sont intéressés à la diffusion des TIC dans l'espace, à la géographie du réseau Internet* » (Dieng, 2008). Ils ont, de leur côté, plutôt envisagé l'analyse des dimensions spatiales des TIC, que ce soit à travers la diffusion des infrastructures en réseaux, les lieux d'expérimentation et d'appropriation des TIC, ou encore le « cybergéospace », comme champ d'analyse des relations humaines liées aux TIC.

Il s'agit ici d'appréhender les relations entre les TIC et l'espace par référence à un autre mode de communication, organisé en réseau, inscrit sur le territoire, mais beaucoup plus ancien et ayant fait l'objet de nombreux travaux : le transport. Les méthodes et les conclusions issues de l'analyse des réseaux de transport sont-elles utiles, sinon directement transposables, à l'étude des effets des nouvelles technologies comme les TIC ?

Cette question était déjà ouverte en 1980, dans le Rapport du *Comité Interministériel à l'Aménagement du Territoire* (CIAT) du VIII^{ème} Plan sous la direction de Rémy Prud'homme. Y était posé le principe selon lequel ce n'est pas l'offre d'infrastructure qui est spatialement structurante, mais sa pénurie ! Le « paradoxe de localisation » proposé est à la fois la confirmation et la réélaboration de ce principe. Sa formulation s'appuie en outre sur la littérature récente relative aux relations entre TIC et territoire (la littérature touchant le transport étant supposée mieux connue). De manière heureuse, la plupart des auteurs traite des mêmes problèmes et s'accorde sur les conclusions essentielles, même si les démarches sont différentes.

D'un point de vue géographique, le développement numérique du territoire correspond aux dynamiques locales engendrées par une distribution inégale dans l'espace des infrastructures de réseaux d'accès à l'Internet. « *Le haut débit répond à un certain principe de subsidiarité pour la gestion d'un service public local, comme c'est déjà le cas pour la distribution électrique, la gestion de l'eau ou la gestion du transport ferroviaire régional.* » (Haddad, 2006).

Comme les télécommunications et les infrastructures de transport rapide, les TIC portent un extraordinaire potentiel de restructuration de l'espace géographique et de

recomposition des relations entre les territoires. Par leurs facultés de commutation des informations, aujourd'hui essentiellement numériques, les TIC assurent la mise en réseaux de ressources, d'ordinateurs, de personnes, d'organisations, allant de l'échelle locale à l'échelle mondiale. Par leur dimension de télécommunication, ces technologies effacent les distances et les contraintes géographiques en permettant le développement des télé-activités, du télé-travail, du télé-enseignement et de l'e-commerce.

La relation entre télécommunications et territoires a donc été approchée sous l'angle de ses effets structurants : l'abolition de la distance spatiale permettrait la délocalisation d'activités industrielles, et la substitution au déplacement physique conduirait à une forte réduction de la mobilité individuelle, les flux virtuels remplaçant les flux physiques de personnes et même des services comme les marchandises par exemple.

1.2. *Internet est un réseau de transport d'informations numériques*

La vision d'une recomposition du territoire grâce aux infrastructures de télécommunications s'appuyait en fait sur deux mythes qui perdurent encore aujourd'hui : celui de la « transparence spatiale » des télécommunications qui, à la différence des infrastructures de transports (autoroutes, TGV, aéroports), n'ont pas d'impact visible sur le paysage, et celui de la « neutralité spatiale », garantissant aux usagers l'accès aux mêmes services d'information et de communication, quelle que soit leur situation géographique (Jonas, 2005).

Les TIC n'ont généralement pas d'effet structurant mesurable sur le territoire, les enquêtes montrent qu'elles ne sont qu'exceptionnellement un facteur décisif de localisation d'une activité, que l'on saisisse le mouvement sous l'angle du changement technique ou des usages économiques. La nouveauté même des TIC est contestée (on ne parle plus des NTIC) : le téléphone est apparu il y a un siècle, le télégraphe plus tôt encore... En revanche, la disponibilité des TIC est bien une condition nécessaire à l'implantation et au développement de n'importe quelle activité, mais au même titre que le branchement d'eau ou l'électricité (Savy, 1998).

Dans le cas de l'eau, les collectivités possèdent des infrastructures de distribution (canalisations), de traitement et d'assainissement (usines) qu'un opérateur vient exploiter via un contrat de concession pour fournir l'eau au consommateur. De même, elles sont propriétaires du réseau basse tension électrique (réseau qui va jusqu'à l'utilisateur final et qui est exploité par EDF). Dans le cas du haut débit, il faut encore investir pour offrir ce service public à l'ensemble des citoyens, en créant et gérant des infrastructures. Notons également que comme pour l'électricité ou le train (mais pas l'eau), elles se retrouvent à gérer des activités issues d'un secteur libéralisé ou en cours de libéralisation dans lequel opère un monopole ou ex-monopole d'État : EDF pour l'électricité, SNCF pour le train et maintenant France Télécom pour les télécommunications (Haddad, 2005).

Dans ces trois points de vue, la notion de réseau est essentielle. Elle peut être définie comme « *l'ensemble des lignes, des voies de communication, des conducteurs électriques, des canalisations, etc., qui dessert une même unité géographique et dépend de la même compagnie* » (Dupuy, 2002). A partir de cette définition, on peut considérer l'Internet à la fois comme un réseau du transport et comme un service public (Dupuy, 2002). Par contre, la plupart des travaux sur ce sujet se basent sur la transposition de modèles anciens connus, comme par exemples celui du télégraphe, du téléphone filaire, ou même celui des infrastructures de transport.

Or, il semble que ces modèles, appliqués à l'évaluation prospective des incidences spatiales des TIC, ne soient pas vraiment pertinents, et cela pour plusieurs raisons. Tout d'abord le développement des TIC est caractérisé par une accélération sans précédent des échanges, illustrée notamment par le déploiement exponentiellement rapide d'Internet et par la diffusion tout aussi rapide - et inattendue, même par les industriels - du téléphone mobile. Ensuite, comme le réseau national téléphonique d'autrefois, les transports ferroviaires, ou, dans une moindre mesure les autoroutes, les infrastructures de communication sont déployées par les États à l'échelle nationale, dans une perspective d'aménagement du territoire, d'équité spatiale et de service public. À l'inverse, les réseaux, les infrastructures et les services de l'information et de communication sont implantés et déterminés sur les territoires par des opérateurs de télécommunication privés et par des stratégies d'entreprises dans un contexte de marché concurrentiel (Jonas, 2005).

Se pose alors la question suivante : Internet est-il vraiment un réseau de communication, aux propriétés similaires à des réseaux traditionnels (routes et autoroutes, voies ferrées, voies navigables) ? Cette question a déjà été posée dans l'atelier « TIC et territoire » organisé en 1996-1997 par le Commissariat Général du Plan (Savy, 2005), d'où il a résulté les éléments de réponse qui suivent.

Physiquement, Internet regroupe l'ensemble de fils téléphoniques en cuivre, câbles coaxiaux, faisceaux hertziens, fibre optique, ondes émises ou reçues par satellites, câble d'alimentation électrique : les transmissions d'Internet utilisent des canaux très variés. A cette hétérogénéité des lignes s'ajoute une variété des machines connectées à Internet. Par ailleurs, la morphologie de ce réseau (Internet) ressemble fortement aux autres réseaux et consiste en plusieurs couches qui présentent des propriétés différentes. D'abord, la couche *infrastructure* assure physiquement les connexions et les liaisons du réseau, la transmission et la distribution

locale, qui devrait être prise en charge par un seul opérateur. Ensuite la couche *infrastructure* est l'intelligence du réseau, c'est-à-dire les protocoles de traitement des flux d'information. Enfin les *services* constituent une troisième couche et représentent les avantages proposés aux utilisateurs du réseau, avec une concurrence entre opérateurs offrant qualités, services et prix variés (Dupuy, 2002). Pour ces raisons, les géographes et même les économistes peuvent finalement considérer l'Internet comme un réseau parmi d'autres (électricité, eau et transport).

Un autre aspect de la comparaison avec les réseaux de transport est de savoir si Internet dessert les mêmes unités géographiques. En effet, la rapidité des télécommunications par Internet ouvre des perspectives de services quasi-instantanés à l'échelle planétaire pour laquelle cette technologie a été conçue.

« Les choses vont toutefois beaucoup plus vite en matière de TIC qu'en matière de transport, si bien que les effets territoriaux des écarts interrégionaux ont moins le temps de s'inscrire durablement sur le territoire. Plusieurs raisons contribuent à cette plus grande rapidité : la fraction linéaire des infrastructures de télécommunications est techniquement plus légère à mettre en place et économiquement moins coûteuse que celle des infrastructures de transport, et la couverture d'un territoire s'effectue plus rapidement (Savy, 2005).

Il s'agit ici d'appréhender les relations entre les TIC et l'espace par référence à un autre mode de communication, organisé en réseau, inscrit sur le territoire, mais beaucoup plus ancien et ayant fait l'objet de nombreux travaux : le transport. (Savy, 1998).

Dans ce contexte, le réseau de fibre optique comme infrastructure de transport de l'Internet, peut effectivement être perçu comme un réseau de communication (transport d'informations numériques) similaire aux réseaux routiers (Savy, 2005). La carte suivante montre l'exemple du département de la Drôme où figurent tous les réseaux de communication et de fibre optique (figure 4). On constate que l'organisation du réseau de fibre optique suit la hiérarchie du réseau routier, suivant les autoroutes puis les routes nationales. La concentration est aussi conforme à la densité de population observée ici sur le département de la Drôme.

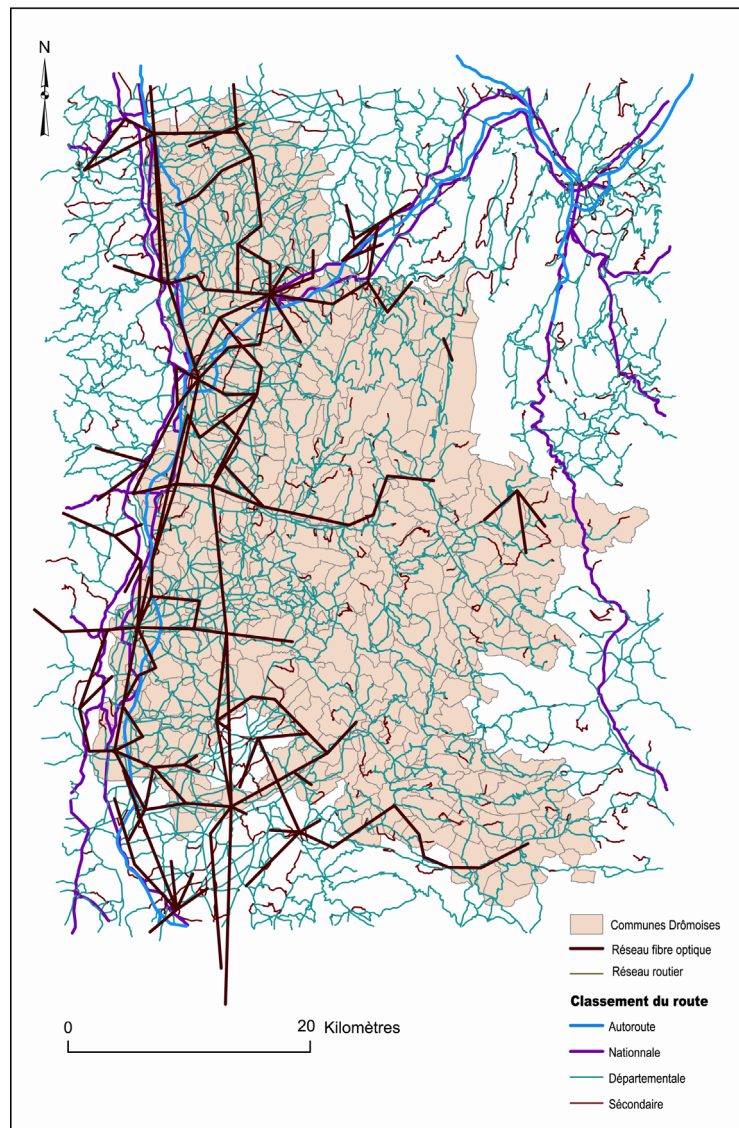


Figure 4. Exemple de réseaux de communication dans le département de la Drôme

1.3. *Les TIC comme élément de développement durable*

Les TIC peuvent jouer un rôle important pour renforcer, développer et diversifier des activités existantes, surtout dans les zones rurales mal desservies, où ils fournissent à la fois informations et assistance pour des activités diverses, et notamment en relation avec les organisations professionnelles et les organismes financiers : données économiques ; service clientèle (par exemple information précise pour les clients et mises à jour rapides, réservation touristique directe évitant les intermédiaires, etc.). En 2006, plus de 5,7 millions de contribuables ont effectué leur déclaration de revenus en ligne contre 3,7 millions en 2005 (Coester, 2007).

Les TIC peuvent aussi jouer un autre rôle pour créer de nouveaux services (Savy, 1998). De nombreuses entreprises et organisations considèrent désormais le télétravail comme une relation directe (quoiqu'à distance) et un moyen d'augmenter la productivité et la flexibilité. De nombreuses agences de développement utilisent aujourd'hui le télétravail comme un outil pour le développement socio-économique du territoire où elles interviennent. De plus en plus d'individus intègrent le télétravail dans leur vie quotidienne pour mieux concilier le travail, la famille et la vie personnelle.

En septembre 2003, le *Canada International Development Research Centre* (CIDRC), a invité 30 personnes venant de plusieurs endroits dans le monde pour discuter de l'information et des technologies de la communication en vue d'une réduction de la pauvreté. Leurs objectifs étaient multiples : discuter des liens entre la diffusion des TIC et la pauvreté dans les pays en développement ; examiner les moyens dont les TIC politiques, la gestion et les investissements peuvent diminuer la pauvreté ; définir les domaines prioritaires d'action et de recherche ; accroître la contribution des TIC à la réduction de la pauvreté. « *Les technologies de l'information et de la communication apparaissent de plus en plus comme un outil efficace pour le développement des pays les plus pauvres, non seulement dans les zones urbaines mais aussi au service de la lutte contre la pauvreté dans les zones rurales* » (Adam, 2005).

Selon le dernier rapport réalisé entre avril et octobre 2008, établi par le Conseil Général de l'Environnement et du Développement Durable et le Conseil Général des Technologies de l'Information, mandatés par le MEEDDAT¹¹ et le MINEIE¹², il faut s'attacher à dégager des consensus et quatre grands constats ont été dégagés :

1. les TIC ont un apport positif pour la *réduction des émissions de gaz à effet de serre* (équivalents CO₂). Toutefois, il est extrêmement difficile de quantifier avec précision cet apport. Selon les estimations, les TIC pourraient permettre d'économiser de 1 à 4 fois les propres émissions de gaz à effet de serre. En effet, c'est l'activité économique dans son ensemble qui réduit ses émissions grâce aux TIC, avec plus particulièrement des gains probants à venir dans les secteurs du transport et du bâtiment.

¹¹ Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire

¹² Ministère de l'Économie de l'Industrie et de l'Emploi

2. L'estimation de la *consommation électrique* liée aux TIC est plus précise. En France, cette consommation est 13,5 % de la consommation d'électricité par les applications finales par an. Elle augmente à un rythme soutenu, d'environ 10 % par an sur les dix dernières années.
3. Le troisième constat est celui d'une *consommation énergétique* loin d'être optimisée. La consommation énergétique due aux TIC recèle ainsi des potentiels de réduction importants. Les exemples de surconsommation d'énergie sont nombreux : la chaleur dissipée par les centres de données n'est pas récupérée, les boîtiers d'interface des opérateurs ne disposent pas de mode de fonctionnement en « veille », les nouveaux écrans plats de télévision sont de plus en plus énergivores..., et il n'existe actuellement pas ou très peu de systèmes d'incitation à l'efficacité énergétique. Des objectifs nationaux ont été fixés dans le cadre de la loi Grenelle 1¹³. La mission constate que le laisser faire dans ce domaine ne permettrait pas de remplir les objectifs de réduction d'énergie que la France tente de poursuivre, à savoir une baisse de 20 % de sa consommation énergétique d'ici 2020.
4. Enfin, la filière de récupération et de *traitement des déchets* n'est pas au niveau d'efficacité voulu. La France serait 2 à 4 fois moins efficace dans ce domaine par rapport à ses grands voisins européens.

1.4. *Une nouvelle conception des relations entre télécommunications et territoire*

Les effets spatiaux des TIC ne sont donc pas toujours ceux attendus, et les projections dans ces domaines doivent écarter certaines idées reçues ou certains présupposés sur un impact automatique, un effet structurant indépendant des contextes sociaux, économiques et géographiques des territoires. Il faut surtout rompre avec la vision angélique de l'homogénéité spatiale garantie par les nouvelles technologies de télécommunication (comme le satellite par

¹³ La loi « **Grenelle 1** » c'est la loi qui pose le « *cadre* » de la mise en oeuvre du Grenelle de l'Environnement, vient d'être adoptée par le Sénat - après l'Assemblée Nationale -. En ce qui concerne l'habitat existant et plus particulièrement la copropriété, elle fixe des objectifs et définit des catégories de moyens. WWW.UNARC.ASSO.FR

exemple), effaçant les disparités territoriales. Pour étudier la relation entre territoires et télécommunications, il faut tenir compte des éléments suivants :

- les télécommunications accentuent la différenciation entre espaces (entre les métropoles et l'espace rural notamment),
- une géographie de l'instantané apparaît, l'espace géographique devenant de plus en plus un espace des flux alors qu'il était perçu auparavant comme un espace des lieux,
- la fluidité spatio-temporelle du travail est liée au développement du travail nomade, du télé-travail et aux délocalisations vers les pays à main d'œuvre bon marché,
- le déploiement des réseaux de télécommunication entraîne inéluctablement une inégalité des territoires : inégalités en termes d'infrastructures, de coûts et de modes d'accès aux services, de standardisation et de réglementation, de financement des grandes infrastructures,
- le rôle des politiques locales.

Plus que les impacts spatiaux des TIC, terminologie qui sous-tend un effet mécanique sur l'espace, il faut étudier les interrelations complexes entre les offres technologiques et le contexte social, culturel, économique, politique, géographique des territoires.

En conclusion, le développement des TIC n'a pas d'effets automatiques sur l'aménagement du territoire. De la même façon que ce n'est pas la gare TGV implantée au beau milieu d'une zone rurale qui va attirer autour d'elle une zone d'activités économiques, ce n'est pas l'installation d'une boucle locale en fibre optique sur une zone, même raccordée aux *backbones* (artères principales ou dorsales qui interconnectent l'ensemble des éléments d'un réseau) de télécommunication à haut débit, qui va attirer à elle seule les entreprises. D'un autre côté, les TIC sont évidemment porteuses en elles-mêmes de nouveaux usages, soit prévus par les opérateurs et les industriels, soit ré-inventés par les usagers eux-mêmes dans leur processus d'appropriation des techniques et des outils (Jonas, 2008).

1.5. *Le réseau Internet peut-il annuler l'effet de la dimension spatiale ?*

« Les Technologies de l'Information et de la Communication (TIC) étaient perçues comme des outils de lutte contre la distance et étaient les vecteurs d'une uniformisation du monde (en même temps elles se présentaient comme l'un des véhicules privilégiés de la mondialisation) » (Bakis, 2010).

« *La distance ne sera plus l'une des factures déterminantes du coût des communications* » (Cairncross, 2001). Cette mort de la distance aura plus d'influence que n'importe quel autre fait économique sur l'évolution de la société pendant la première moitié du XXI^e siècle. Son influence s'exercera, d'une façon que nous ne pouvons imaginer totalement, sur les décisions des individus concernant leur lieu de résidence et de travail, sur le concept de frontière nationale et sur la structure du commerce international. La « *mort de la distance* » signifie que les activités qui nécessitent seulement un écran (d'ordinateur) ou un téléphone pourront être pratiquées n'importe où dans le monde. » (Cairncross, 2001). Mais cela ne veut absolument pas dire que la dimension spatiale n'aura plus d'importance. Au contraire, lorsque l'espace s'élargit, le rôle de la nouvelle technologie de la communication devient plus important. Dans ce sens, Maryan P. Feldman précise :

« Les travailleurs se verront moins souvent imposer leurs lieux de résidence par la proximité des ressources naturelles ou des moyens de transport, ou par le caprice de leur employeur. Suivant cette vision utopique, Internet et la révolution numérique vont permettre aux individus de choisir librement leur lieu de résidence et de travail » (Feldman, 2002).

Libérant les hommes des contraintes d'éloignement et d'isolement géographique, les TIC bouleversent notre perception de l'espace et notre rapport aux autres. Les lignes de train à grande vitesse et le réseau mondial d'aéroports construisent aujourd'hui un maillage planétaire de moyens de transports rapides, dont les nœuds sont formés par les grandes métropoles, distantes les unes des autres de quelques heures d'avion. Londres, Bruxelles ou Francfort sont mieux reliées à Paris que certaines villes en France (Feldman, 2002).

Dans ce contexte, les TIC, et plus particulièrement les télécommunications et le réseau Internet, assurent l'instantanéité des échanges immatériels et des communications entre les personnes, quelle que soit leur localisation sur la planète. Cette contraction de l'espace et du temps s'accompagne d'une démocratisation de l'accès aux moyens de communication.

Les coûts du transport aérien, comme ceux des télécommunications, sont de moins en moins élevés. L'accès à l'Internet est facturé au prix d'une communication téléphonique locale ou selon un forfait à coût modéré, quand il n'est pas carrément gratuit, financé par la publicité. Notre perception de l'espace géographique se construit aujourd'hui sur cette nouvelle donne technique et économique qui semble gommer les contraintes de distances spatiales et recomposer les territoires par la puissance commutative des réseaux d'information et de télécommunication.

1.6. *Le réseau Internet supprime les frontières nationales (un réseau mondial)*

Alors que la création des réseaux d'eau, de gaz, électricité, de radio et de télévision est envisagée au niveau national, un site Internet s'inscrit au niveau mondial. « *Un internaute quelle que soit sa situation géographique, il a accès à toutes les informations et à tous les services disponibles sur l'Internet, et il peut communiquer avec tous les autres individus reliés au réseau* » (Maryann, 2002). Le réseau Internet ignore les frontières par son déploiement mondial, ne connaissant pas non plus la distance géographique (figure 5). Les télécommunications à longue distance avaient été initiées par l'internationalisation progressive du réseau téléphonique.

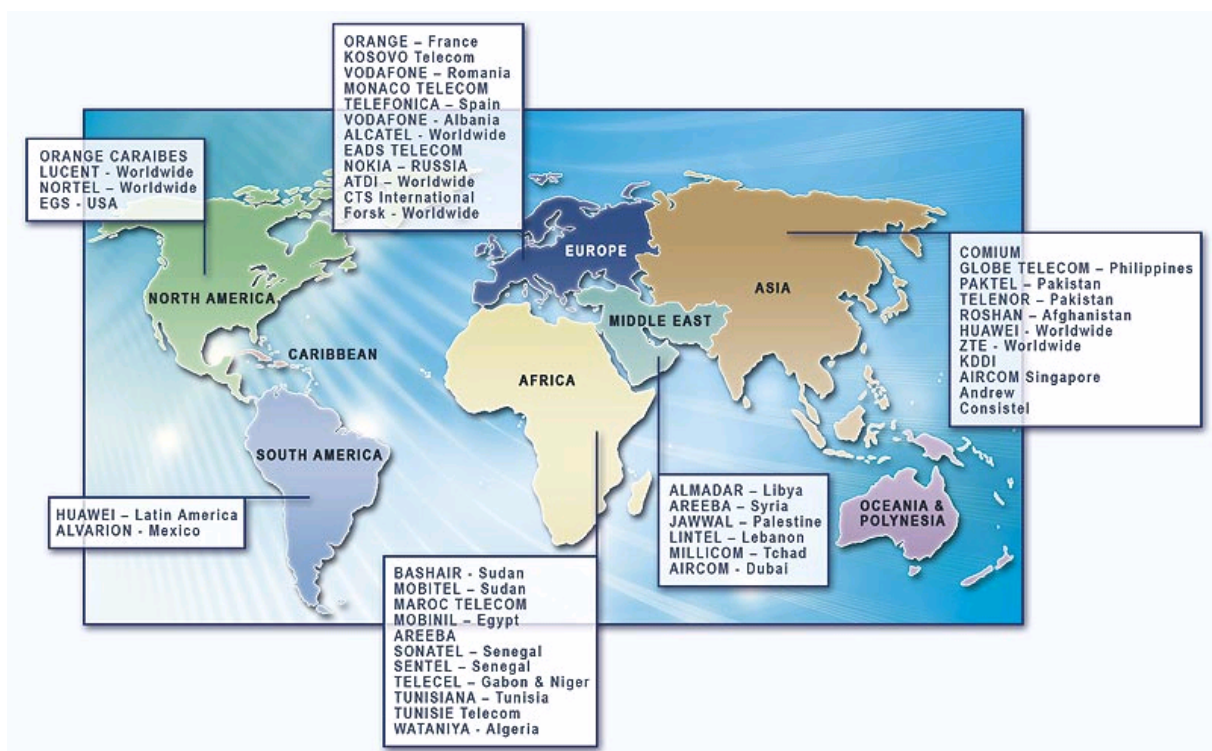


Figure 5. Opérateurs télécoms dans le monde (www.geoimage.fr)

Dans *Internet - Géographie d'un réseau* (2002), Gabriel Dupuy montre différentes tendances spatiales, à la fois classiques et inédites que présente ce réseau très ouvert, en examinant ses phases de croissance dans le monde et sa morphologie particulière. L'infrastructure d'Internet repose en premier lieu sur l'état des infrastructures de télécommunications préexistantes et sur le taux d'équipement informatique d'un pays, déterminant la rapidité avec laquelle Internet peut se diffuser. Ainsi, malgré quelques exceptions, les périphéries d'Internet à l'échelle mondiale se trouvent principalement en

Afrique, en Amérique Centrale, en Asie et dans les pays d'Europe centrale et orientale. Des disparités s'observent cependant à d'autres échelles, nationales, infranationales et urbaines, y compris des pays centres comme les États-Unis.

- *Le rôle politique* est important à cette échelle mondiale. Certains Etats se montrent aujourd'hui de plus en plus inquiets face aux risques de transgressions de leurs frontières par Internet (Dupuy, 2002) (figure 6).

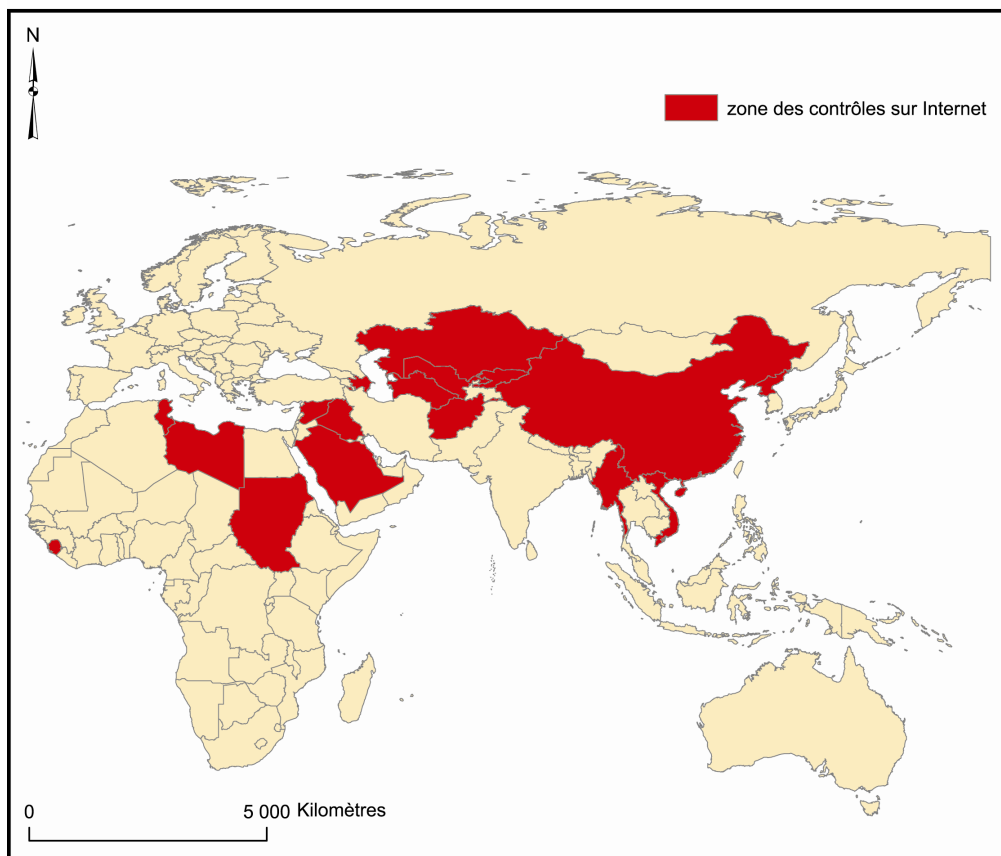


Figure 6. Pays exerçant des contrôles politiques ou religieux sur les contenus et la navigation sur le web (Dupuy, 2002)

On constate que les infrastructures et les infostructures peuvent être plus ou moins développées à cause de cette réduction des usages d'Internet. En Birmanie, en Corée du Nord, l'accès Internet est pratiquement réservé à quelques privilégiés qui se connectent par satellite. En Arabie Saoudite, malgré la rapide croissance d'Internet, pour 26.8% de la population totale en 2009, la plupart des accès se font par l'intermédiaire d'un serveur « Proxy » situé à Djeddah, qui permet un contrôle des frontières (Dupuy, 2002).

En Syrie, à la fin de 1997, il n’y avait que deux places avec un accès Internet, l’*American Cultural Centre* et le *Syrien Engineers Association*, toutes les deux situées dans la ville de Damas. Lorsque Bashar Al Assad est devenu président de la Syrie en 2000, Internet est devenu plus facile d’accès pour plus de 30 000 usagers. Ce nombre atteint à la fin de l’année 2009 plus de 3,5 millions d’abonnés (IWS, 2009).

Le Koweït est également un bon exemple de la participation de la politique à la diffusion du réseau Internet. Le service Internet a été mis en place en 1992 dans le cadre de la reconstruction du pays après l’invasion iraquienne (Deborah, 2004). Le nombre d’usagers au Koweït est passé de 150 000 en 2000 à 1 million usagers en 2009.

- Le second aspect marquant du déploiement Internet au niveau mondial est *l’aspect économique*. Le monde est divisé en deux groupes : le groupe des pays développés et le groupe de pays non développés ; autrement dit, les pays riches et les pays pauvres. « *Les chances de pouvoir utiliser Internet sont 22 fois plus grandes dans un pays à revenu élevé que dans un pays à faible revenu* » (CNUCED¹⁴, 2006). La figure suivante montre que les plus forts taux de croissance du nombre d’internautes ont été enregistrés dans les pays développés pendant ces 10 dernières années (figure 7).

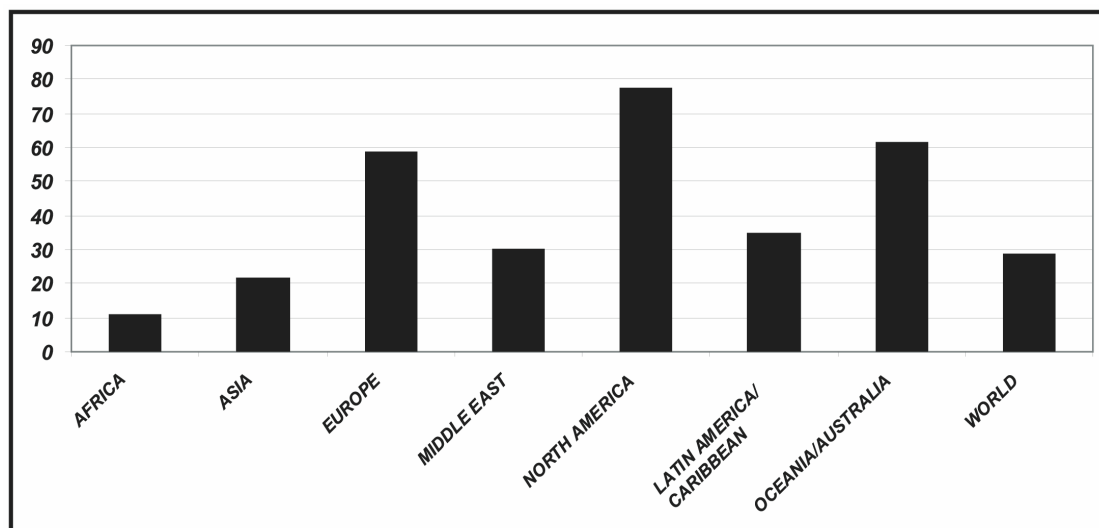


Figure 7. Pourcentage de croissance du nombre des internautes dans le monde entre 2000 et 2009 (Internet World Stat, 2009)

¹⁴ Conférence des Nations-Unies sur le Commerce Et le Développement.

Les compétences indispensables à une bonne exploitation des TIC deviennent des facteurs critiques en termes d'intégration socio-économique (Vodoz, Reinhardt, 2004). La question du temps aggrave la fracture numérique et pose la question du rattrapage des inégalités territoriales. Dans les pays en cours de développement, on assiste à une inversion des inégalités entre régions centrales et périphériques. Bien que manquant d'infrastructures, ces périphéries attirent de plus en plus des populations aisées et qualifiées, attendant d'être équipée d'une connexion Internet appropriée, tandis que les centres urbains ou métropolitains concentrent des lieux de pauvreté (Vodoz et Reinhardt, 2004). D'après l'Office des statistiques du travail des États-Unis, le secteur des technologies de l'information et de la communication est devenu depuis 1999 le principal secteur d'activité commerciale du pays, avec un taux de croissance de l'emploi six fois supérieur à la moyenne nationale.

Dans le rapport de la CNUCED, intitulé « *The Digital Divide : ICT Diffusion Index 2005* », on trouvera, sans surprise, les pays industrialisés (Amérique du Nord, d'Europe de l'Ouest ainsi que les tigres d'Asie), en tête du développement numérique. Les facteurs responsables de la fracture numérique sont nombreux mais la pauvreté joue le rôle principal. « *Dans les pays à revenu élevé, l'accès à Internet en termes de coût par rapport aux revenus, est plus de 150 fois meilleur marché que dans les pays à faible revenu* » (CNUCED, 2006).

Malgré la crise économique mondiale, les dépenses consacrées aux technologies de l'information et de la communication résistent. En 2008, elles ont dépassé les 1000 milliards de dollars dans les quinze pays de la zone euro (soit 1020 milliards de dollars). La zone euro se rapproche des États-Unis où 1061 milliards de dollars ont été dépensés en 2008 (figure 8).

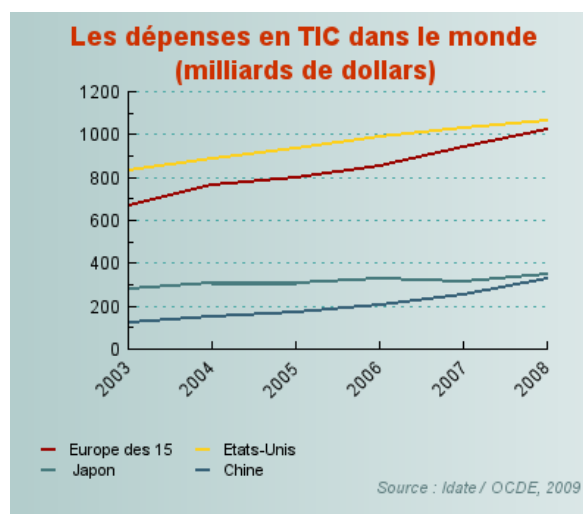


Figure 8. Dépenses en TIC dans le monde (IDATE, 2009)

1.7. *Les différenciations régionales de développement numérique : étude sur le bassin méditerranéen*

« La diffusion des TIC semble être un processus irréversible qui touche progressivement toutes les régions du monde » (Grasland, 2005). De ce point de vue, le bassin méditerranéen est un bon exemple d’étude des modalités de diffusion des TIC dans des territoires différents car il concerne 17 pays situés dans trois régions distinctes (Asie, Afrique et Europe) du monde. Ces pays sont différents, tant par leur niveau de développement économique, par leur culture, leurs types de technologie que par la diversité des usages.

La figure suivante montre le pourcentage d’internautes par rapport à la population totale de plusieurs pays situés autour du bassin méditerranéen (figure 9). L’Algérie et la Libye sont les pays utilisant le moins Internet : la part des internautes représente moins de 13% de la population. Dans ces deux pays, Internet peut être considéré comme un phénomène récent. A titre d’exemple, la première connexion privée à l’Internet en Libye a été attribuée par LTT (Libya Telecom and Technology) en août 1999.

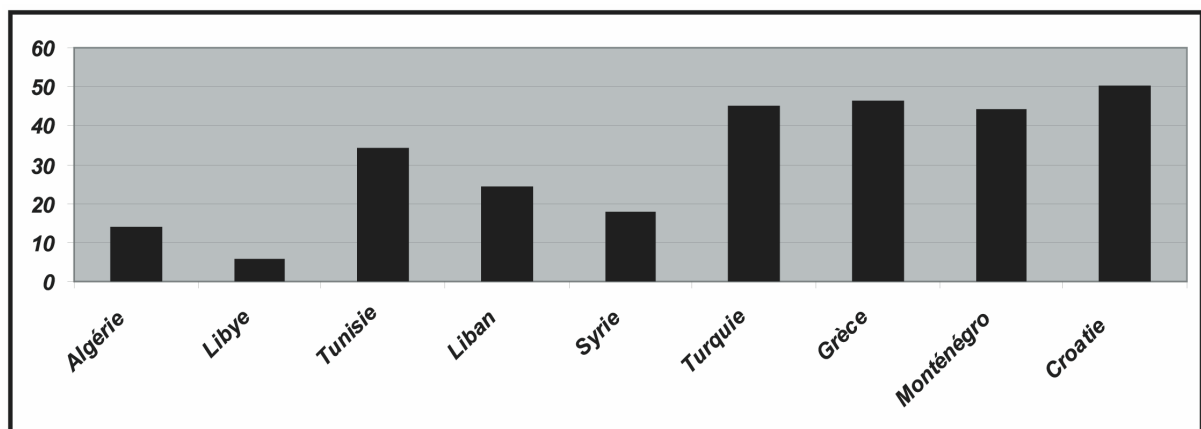


Figure 9. Pourcentage de la pénétration d’Internet dans quelques pays méditerranéens par rapport leur population totale en 2009 (IWS Internet World Stat, 2009)

1.8. *Le haut débit en France*

Il y a 20 ans, Internet était un phénomène inconnu en France. En décembre 2009, 34,7 millions de personnes (ce qui représente 65% des français âgés de 11 ans et plus) se sont connectés à Internet au cours du dernier mois, soit une progression de 45,2 % en 5 ans (Médiamétrie, 2010). Le nombre d’internautes qui se connectent tous les jours atteint même le

chiffre de 19,8 millions en 2009, soit une augmentation de 12,5 % par rapport à 2008 (figure 10). Lorsque l'on regarde les chiffres pour l'année 2009, le nombre d'Internautes, les pages accessibles au public par le Web et les courriels fournissent des informations surprenantes : les internautes passent en moyenne 1h20 par jour sur Internet, soit près de 10 minutes de plus qu'en 2008. À cet égard, *« ne pas être connecté à Internet, ou l'être superficiellement, c'est se faire marginaliser dans le système planétaire en réseaux. Se développer sans Internet aujourd'hui, ce serait comme si industrialiser sans électricité hier »* (Castells, 2005).

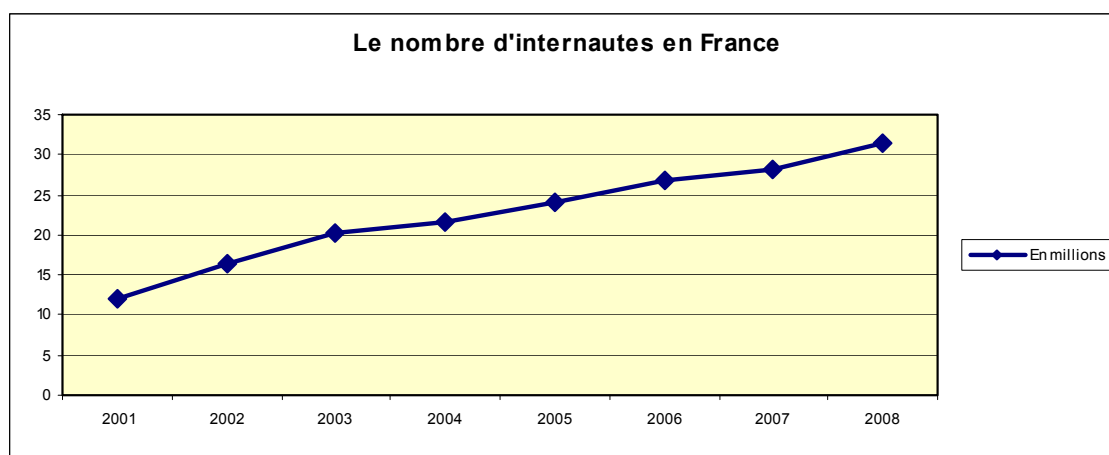


Figure 10. Nombre d'internautes en France (Journal du Net, 2009)

La France comptait 17,2 millions d'abonnements à Internet à haut débit au septembre 2009, dont 18,9 millions d'abonnements ADSL.¹⁵ Le nombre d'abonnements est passé à 490 000 au cours du troisième trimestre (+3%) et sur un an, cela représente une augmentation de 16 % (plus de 2,3 millions d'abonnement en un an). En corollaire, le nombre d'accès Internet bas débit (0,7 million à la fin du troisième trimestre 2009) et le volume de trafic généré par cet accès diminuent de façon très rapide depuis plusieurs années (figure 11).

¹⁵ Selon les dernières estimations, la France compterait environ 20,5 millions d'abonnés à l'Internet en haut débit à la date du 30 juin 2010. Dix neuf millions de foyers sont raccordés via la technologie DSL, 0,940 million par le câble et 0,4 million ont accès à l'Internet à très haut débit, dont 90 000 par la fibre optique. La concurrence demeure forte entre les acteurs, avec des rotations inévitables d'abonnés pour chacun des trimestres, soit pour des raisons de service après vente jugé insuffisant, soit pour des offres de prix ou de services triples ou quadruples nouvelles. www.strategiestm.com/spip.php?page=print&id_article=4014

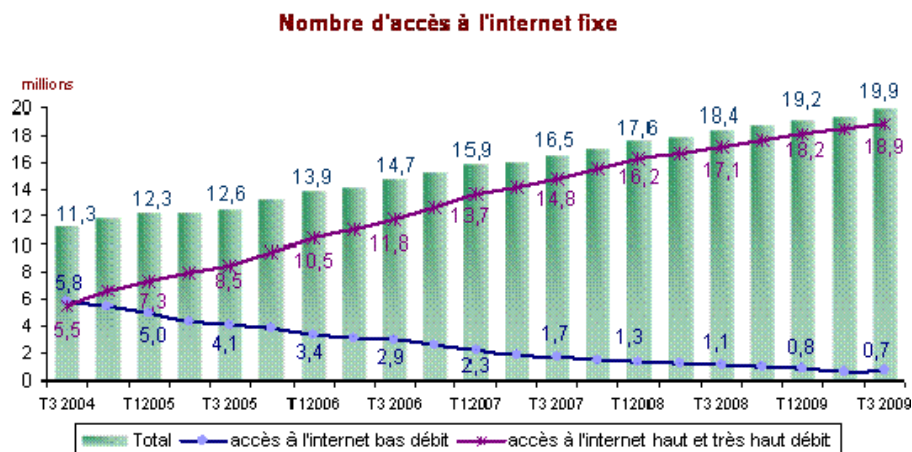


Figure 11. Parc d'accès à Internet (ARCEP, 2010)

Le déploiement du DSL (*Digital Subscriber Line*) par France Télécom sur l'ensemble du territoire arrive à son terme, avec un équipement de l'ensemble des nœuds de raccordement d'abonnés (12 511 NRA en France). Environ 500 000 lignes ne sont cependant pas éligibles au titre d'une connexion haut débit en août 2007.¹⁶ Cette éligibilité permet en réalité de savoir si la ligne téléphonique supporte la technologie ADSL ou non. Au 31 mars 2008, la France comptait 16,2 millions d'accès à Internet haut débit, selon l'Observatoire trimestriel de l'Arcep, soit une hausse de 4,3 % sur le trimestre et de 19% sur un an. La part de l'ADSL continue d'augmenter, atteignant 95,4 % des abonnements. 5 552 millions des accès sont dégroupés, dont 4 012 en dégroupage total. Plus de 380 000 abonnements ont été créés en dégroupage total (résidentiel et professionnel) sur le trimestre, alors que le partiel recule de 54 000, repassant ainsi à 1 509 millions (figure 12).¹⁷

(en %)

	Juin 2004			Juin 2005			Juin 2006			Juin 2007			Juin 2008		
	18 ans et plus	12 17 ans	Ens.	18 ans et plus	12 17 ans	Ens.	18 ans et plus	12 17 ans	Ens.	18 ans et plus	12 17 ans	Ens.	18 ans et plus	12 17 ans	Ens.
. Oui.....	54	60	55	74	83	75	89	85	88	92	95	93	96	95	96
. Non.....	44	40	43	26	16	24	10	13	11	7	5	7	3	3	3
Total (yc nsp).....	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Figure 12. Taux de personnes disposant d'un accès Internet haut débit à leur domicile en France (CREDOC, 2008)

¹⁶ La lettre de l'autorité de régulation des communications électroniques et des postes, mai/juin/juillet 2007.

¹⁷ <http://www.journaldunet.com/ebusiness/rubriques/chiffre-cle-hebdo/080602-chiffres-cles/1.shtml>.

D'après la sixième édition de l'étude Mediascope réalisée pour l'EIAA 2008 (European Interactive Advertising Association) sur la consommation d'Internet en Europe, les Français sont les plus grands consommateurs d'Internet au quotidien. Ils sont en effet 67 % à se connecter chaque jour au Web, contre une moyenne européenne de 55 %. De plus, 29 % des internautes français seraient connectés sur Internet 16 heures par semaine, soit un peu plus que la moyenne des européens. C'est dans les trois pays asiatiques de cette étude que les conséquences d'une absence d'accès à Internet seraient les plus fortes. Sollicités pour noter de 1 à 10 cet impact sur leur vie personnelle, les Chinois ont par exemple donné une note moyenne de 7,7. Les Français seraient également très affectés par une privation d'Internet (6,9 %), ce qui est aussi légèrement plus que les Canadiens (5,8 %) (figure 13).¹⁸

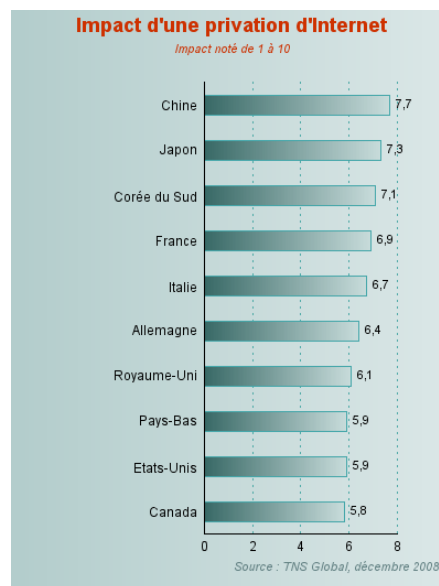


Figure 13. Perception d'une privation d'Internet dans les pays développés

La consommation d'Internet s'explique en partie par la généralisation du haut débit, qui fait de la France la championne d'Europe en la matière : 92 % des internautes français en sont équipés, alors qu'en moyenne les européens ne le sont qu'à 80 %. Les Français sont d'ailleurs particulièrement sensibles à la liberté et à la flexibilité de l'Internet sans fil, puisque 45 % des abonnés haut débit de l'Hexagone utilisent le Wi-Fi.¹⁹ En France encore plus qu'ailleurs en

¹⁸<http://www.journaldunet.com/ebusiness/le-net/dossier/ou-se-situent-les-francais-en-matiere-d-usages-internet/ou-se-situent-les-francais-en-matiere-d-usages-internet.shtml>

¹⁹<http://www.journaldunet.com/ebusiness/le-net/dossier/que-font-les-francais-d-internet/l-usage-quotidien-d-internet-s-est-generalise.shtml>

Europe, Internet est utilisé pour garder contact avec ses proches ou ses connaissances. Ce sont en effet 83 % des internautes français qui déclarent profiter d'Internet pour communiquer davantage avec eux, contre 73 % en Europe. Les Français sont aussi plus enclins que la moyenne des Européens à se servir du Web pour comparer des produits et services et pour gérer leurs finances. En revanche, Internet les incite moins qu'ailleurs en Europe à réserver ou organiser des vacances. L'analyse de l'accès à l'ADSL révèle des critères indéniablement simples d'aménagement par rapport à l'organisation de l'espace français : la technologie se déploie en fonction des densités de population et d'activités. La présentation cartographique de la diffusion de l'ADSL montre toujours une grande conformité avec le système de peuplement. L'ADSL est disponible là où la population demeure dense (Grasland, 2003). En général, l'accès à l'ADSL est un phénomène typiquement urbain en France, ce qui sous-entend que sa diffusion se fait de manière plus difficile dans les zones rurales (figure 14).

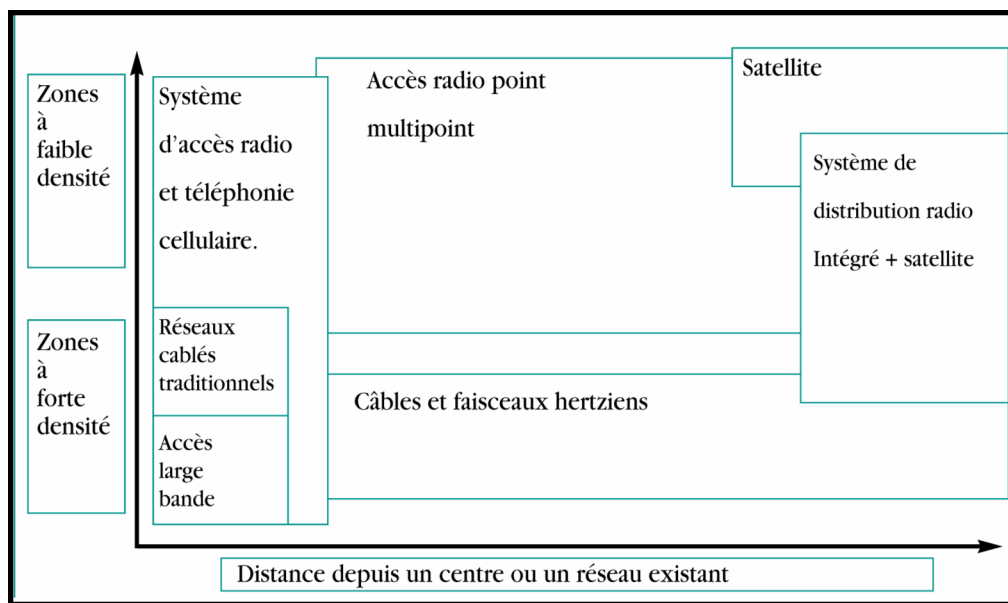


Figure 14. Diversité des technologies en fonction de la densité et de l'éloignement (Adam, 2005)

Conclusion

La relation entre télécommunications et territoires a été analysée sous l'angle de ses effets structurants : l'abolition de la distance permet la délocalisation d'activités industrielles alors que la substitution au déplacement physique conduit à une forte réduction de la mobilité individuelle, les flux virtuels remplaçant les flux physiques de personnes et la fréquentation de certains commerces et services. Les TIC ont un rôle important pour renforcer, développer et diversifier des activités existantes, surtout dans les zones rurales qui sont mal desservies.

« Il s'agit ici d'appréhender les relations entre les TIC et l'espace par référence à un autre mode de communication, organisé en réseau, inscrit sur le territoire, mais beaucoup plus ancien et ayant fait l'objet de nombreux travaux : le transport » (Savy, 1998). Dans ce contexte, le réseau de fibre optique comme infrastructure de transport de l'Internet est perçu comme un réseau de communication (transport des informations numériques) en référence au principe d'organisation des réseaux routiers.

La « *mort de la distance* » avec les TIC signifie que les activités qui nécessitent seulement un écran (d'ordinateur) ou un téléphone pourront être pratiquées n'importe où dans le monde (Cairncross, 2001). Mais cela ne veut pas dire que la dimension spatiale n'aura plus d'importance. Au contraire, plus l'étendue ou les distances sont grandes, plus le rôle des TIC s'avère stratégique.

L'analyse mondiale, nationale et régionale de la diffusion des TIC, confirme l'existence d'une fracture numérique à ces trois échelles. Les causes de ce phénomène sont différentes selon les caractéristiques des espaces géographiques. Cette inégalité peut en effet être reliée à différentes échelles d'observation. A l'échelle mondiale, la fracture numérique apparaît plutôt pour des raisons économiques ou politiques, qui découpent l'espace en deux catégories de pays : pauvres et riches. Par contre, à l'échelle de la zone méditerranéenne, les causes de ces inégalités paraissent plutôt culturelles et économiques alors qu'à l'échelle de la France, elles apparaissent plus spécialement liées à la répartition différente de la population et à sa localisation dans l'espace, avec une forte opposition milieu urbain / milieu rural.

CHAPITRE 2

Inégalités spatiales dans la desserte d'Internet et dans les modes de connexion en France

Introduction

L'inégalité dans la desserte numérique est exprimée par l'expression de la fracture numérique. Ce terme apparaît en 1995, et il a connu un réel essor suite au rapport « Falling Through the Net » publié par le NTIA²⁰ en 1999. « *Cette expression est floue, plurielle et flexible* » (Fautrero, 2006). Elle représente une forme d'inégalité socio-économique pour les acteurs considérés indispensables ou incontournables dans le développement économique et sociale des territoires. « *Les discontinuités sont fondamentales pour comprendre l'organisation de l'espace, la différenciation des lieux, la diversité de notre planète* » (Bakis, 2010). Ce chapitre 2 présente la situation actuelle de l'inclusion numérique en France et au sein des communes rurales en particulier. A cet objectif, le département de la Drôme a été choisi pour montrer les écarts de développement numérique selon les localisations géographiques urbaines et rurales. « *Chaque terrain d'expérimentation correspond à un profil socio-économique et culturel différent pouvant dès lors constituer, apriori, le creuset de processus d'appropriation de la technologie différents* » (Fautrero, 2006). Dans ce contexte, il apparaît indispensable de mesurer le fonctionnement de différentes technologies, filaires et non filaires, qui peuvent être adaptés au type de territoire à équiper. Ce chapitre cherche aussi à évaluer l'impact de chaque mode de connexion à Internet tout en définissant leurs avantages et/ou leurs inconvénients. Il est important de porter une attention particulière à ces points techniques de fonctionnement, utiles pour les géographes qui vont pouvoir ensuite choisir la technologie adaptée à leurs terrains d'étude.

²⁰ US Department of Commerce's National Telecommunications and Information Administration. Elle opposait ceux qui avaient accès aux nouvelles technologies à ceux qui n'avaient pas accès.

2.1. *Inégalités territoriales de répartition des réseaux de télécommunication en France*

La cartographie des réseaux de télécommunication montre que l'accès à l'Internet rapide « haut débit » est inégalement réparti sur les territoires. En France, les territoires « connectés » correspondent avant tout à des zones urbanisées et plutôt dynamiques. Au contraire, les territoires ruraux restent « exclus » dans la dynamique de diffusion d'Internet : la « diagonale du vide », pour reprendre ici l'expression de Roger Brunet, est bien visible sur la carte et elle ne risque pas de disparaître dans les années à venir (figure 15).

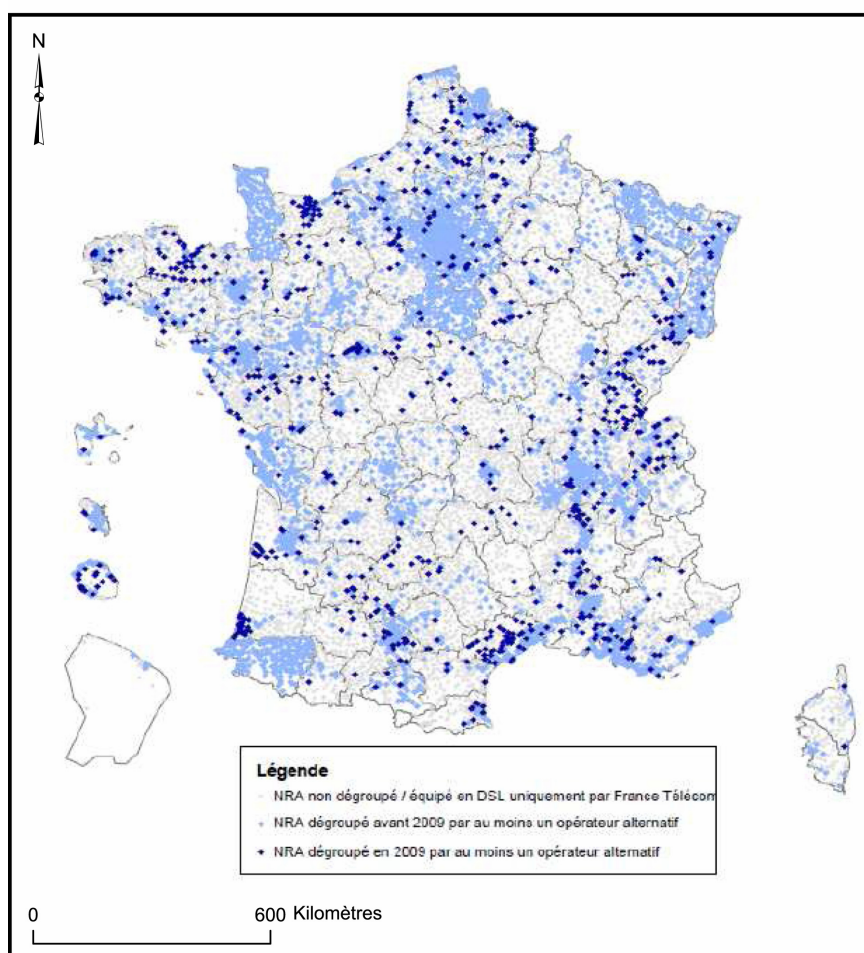


Figure 15. Couverture du territoire français par le DSL au 31 décembre 2009 (ARCEP, 2010)

Les zones dites « blanches » présentent généralement des potentiels commerciaux plus faibles et la rentabilité est difficile à assurer sans une participation publique car les revenus ne permettent pas de rentabiliser les coûts d'investissement. Ces zones « blanches » sont définies par l'ARCEP comme des communes à faible concentration de population et pour lesquelles, sur une partie significative de leur territoire, il n'est économiquement pas viable pour

plusieurs opérateurs de déployer leurs propres infrastructures, en l'occurrence leurs réseaux de fibre optique, au plus près des logements (ARCEP, 2010).

Cette inégalité territoriale, qui s'appelle la *fracture numérique* ou le *fossé numérique*, est une préoccupation géographique. Cette fracture numérique est représentée par les territoires mal ou non desservis et cette carence numérique pénalise, à terme, le développement local. Pour l'instant, la couverture totale de 100% du territoire français avec des services 2 Mb/s est toujours un objectif. La combinaison entre deux technologies, filaire et non filaire, est une solution pour réduire cette fracture territoriale (Ballard, 2009). Les solutions proposées pour réduire les inégalités territoires numériques ou e-inclusion sont diverses. Eutelsat, par exemple, propose le service *Tooway* pour l'accès haut débit par satellite pour les particuliers mais à prix élevé (Blanc, 2009).

Le CREDOC a fait une analyse pour quantifier et mesurer les inégalités existantes par un calcul de coefficient de Gini durant plusieurs années. La figure suivante montre le pourcentage et l'évolution de ce coefficient. La valeur zéro signifie qu'il n'y a pas d'inégalités et 100% signifie qu'un seul élément détient tout l'équipement. La figure 16 montre l'allure des inégalités d'équipement en ordinateur, en connexion à Internet et en téléphone mobile sur une période allant de 1995 à 2008.

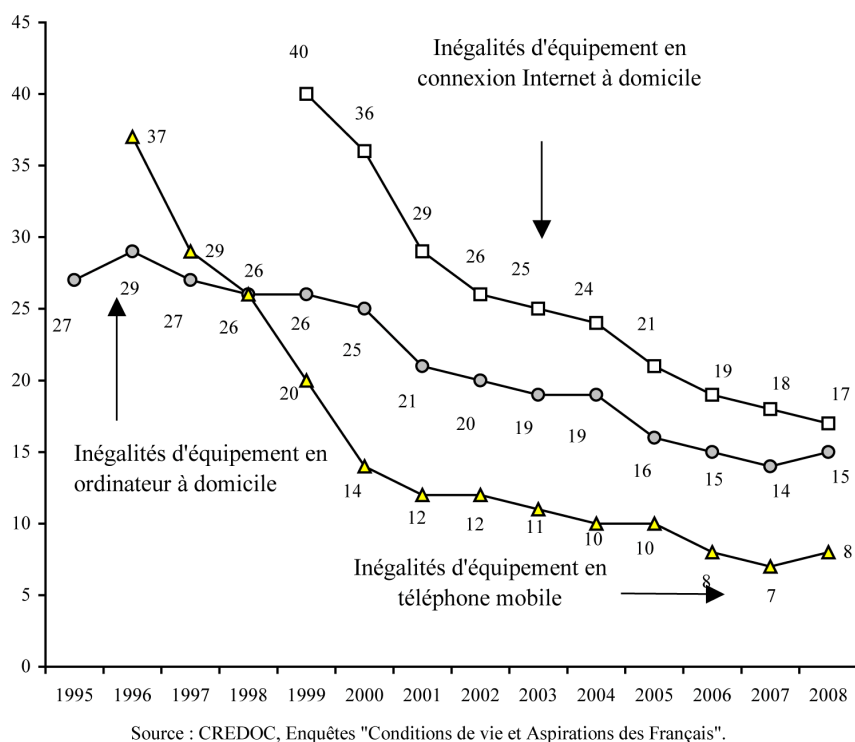


Figure 16. Evolution des inégalités d'équipement mesurée par le coefficient de Gini (en %)

Plusieurs observations se dégagent de cette étude: les inégalités sont fortes pour l'équipement en Internet et en ordinateur à domicile par rapport au téléphone mobile ; le mouvement de baisse régulièrement observé depuis 1995 semble s'interrompre en 2008 pour l'ordinateur et le téléphone mobile. Par ailleurs, les inégalités pour Internet sont deux fois moins marquées en 2008 qu'au début des années 2000.

Mais, au final, les télécommunications renforcent les inégalités territoriales. Dans un premier temps, les nouveaux réseaux s'implantent de préférence dans les zones où sont concentrées les populations. Si, dans un deuxième temps, les techniques et les réseaux se diffusent, amenuisant la valeur ajoutée des réseaux de première génération, de nouveaux besoins en matière de télécommunication apparaissent également, avec des applications qui vont se déployer de préférence dans les zones les plus développées.

2.2. *La couverture du milieu rural par le haut débit (France)*

De nouvelles générations de réseaux plus performants dans l'infrastructure et la qualité des services se développent. Leur vitesse de pénétration dépend de multiples facteurs parmi lesquels le taux de rentabilité compte grandement. Or les technologies d'accès aux différents types de réseaux - Locaux (LAN), métropolitains (MAN) et internationaux (WAN), se diversifient de façon croissante depuis quelques années, pour offrir des prestations différentes selon les clientèles : résidentielle avec des débits crêtes et asymétriques, ou d'entreprise avec des débits garantis, symétriques et une fiabilité accrue. Les infrastructures évoluent, du réseau RTC à la fibre optique permettant des accès VTHD (Vraiment Très Haut Débit). Les différents modes d'accès permettent de s'adapter à différents besoins et ouvrent de multiples applications et usages, comme le montrent par exemple les plateformes dédiées aux échanges entre centres scientifiques.

Le réseau téléphonique n'a pas été construit pour la fourniture d'Internet à haut débit. Environ 1,7% de la population (550 000 lignes) demeure inéligible à l'ADSL malgré l'équipement par France Télécom de l'ensemble de répartiteurs. « *La principale cause d'inéligibilité est la longueur excessive des lignes* ». ²¹ Une minorité des zones blanches de l'ADSL sont couvertes par d'autres technologies.

²¹ Table-ronde sur la couverture numérique du territoire, mardi 17 février 2009, Assemblée Nationale.

Avant de s'interroger sur les usages d'Internet qui peuvent intéresser les communes rurales, il faut d'abord dresser un état des lieux des infrastructures et de l'accès au haut débit dans ces territoires.

Dans le cadre des compétences qu'elles se sont vues reconnaître par la loi en 2004, les collectivités territoriales se sont largement focalisées sur les zones blanches. Bruno Janet, directeur des relations avec les collectivités locales de France Télécom, présente cet état des lieux en soulignant que la situation a beaucoup évolué depuis 2004. En retard à l'époque par rapport à d'autres pays européens, les différents plans (« haut débit pour tous », « zones d'activité »), mis en place par France Télécom, ont permis de redresser la barre, permettant à la France de devenir le premier pays européen pour le nombre d'abonnés à Internet.

Sur le plan de l'aménagement du territoire, France Télécom a étendu la couverture haut débit qui est aujourd'hui de 98 % du territoire français. Les chartes « département innovant », conclues entre France Télécom et les collectivités, permettent une programmation très claire, avec des engagements précis auprès des élus en termes de délais pour l'accès au haut débit dans leur commune. Les 2 % du territoire non éligible posent en revanche des problèmes dans la mesure où la rentabilité n'est pas au rendez vous. En moyenne, il reste environ 40 communes par département qui ne sont pas encore en zone éligible (Assemblée Générale, 2006). France Télécom ne peut aller au-delà des efforts réalisés. Le relais doit désormais être pris par la force publique : appels d'offres, délégation de service public, cofinancement, sans oublier les subventions qui peuvent être octroyées par l'Europe, sont autant de moyens qu'il faudra mettre en œuvre pour résorber les dernières zones blanches.

Techniquement, des solutions sont envisageables :

- Le pack Wi-Fi ou Wimax peut être utilisé dans ces zones blanches pour permettre d'accéder à un débit supérieur à 512 Kb ;
- Le courant porteur en ligne (à expliquer un peu plus ?) : des expérimentations sont en cours en Dordogne et en Savoie (Janet, 2006).

Les technologies ADSL ne sont pas les seules technologies de boucle locale et ne peuvent pas, à elles seules, répondre à l'ensemble des besoins, soit pour des raisons de performances techniques, soit pour des raisons de diffusion géographique de ces technologies. Il convient donc de ne pas oublier le principe suivant : aucune technologie n'est universelle. En revanche, elles peuvent présenter des complémentarités, notamment en fonction de caractéristiques propres à un territoire spécifique (figure 17).

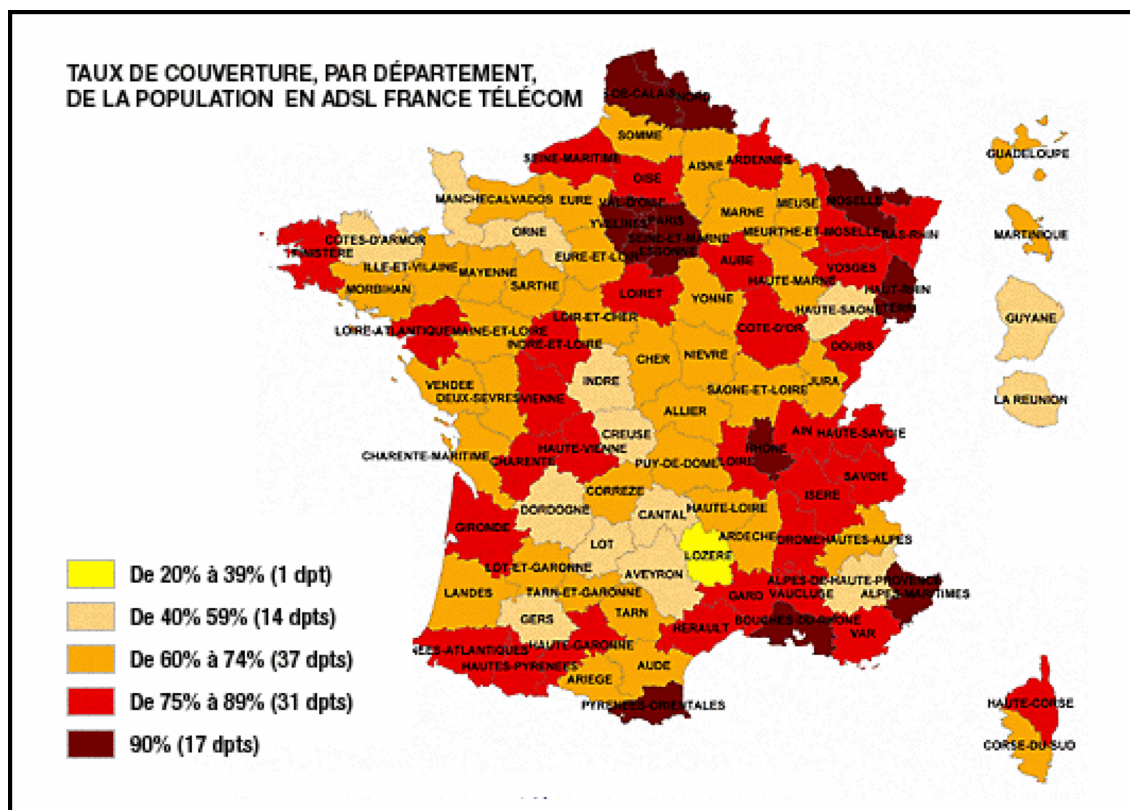


Figure 17. Taux de couverture par l'ADSL par département (FT, 2006)

*Ainsi, à chaque territoire, une technologie de desserte haut débit sera plus ou moins bien adaptée. Desservir un territoire consiste, à partir d'une infrastructure longue distance existante, à trouver le couple technologie de **collecte** / technologie de **desserte** le plus approprié aux caractéristiques de ce territoire. Ces caractéristiques sont de différentes natures : topographie du territoire, proximité par rapport aux infrastructures et aux réseaux longues distances, densité de la population, répartition spatiale de la population, type d'habitat (urbain, rural...) ²²...* (figure 18)

²² http://territoires.rhonealpes.fr/IMG/pdf_Infracstructures.pdf

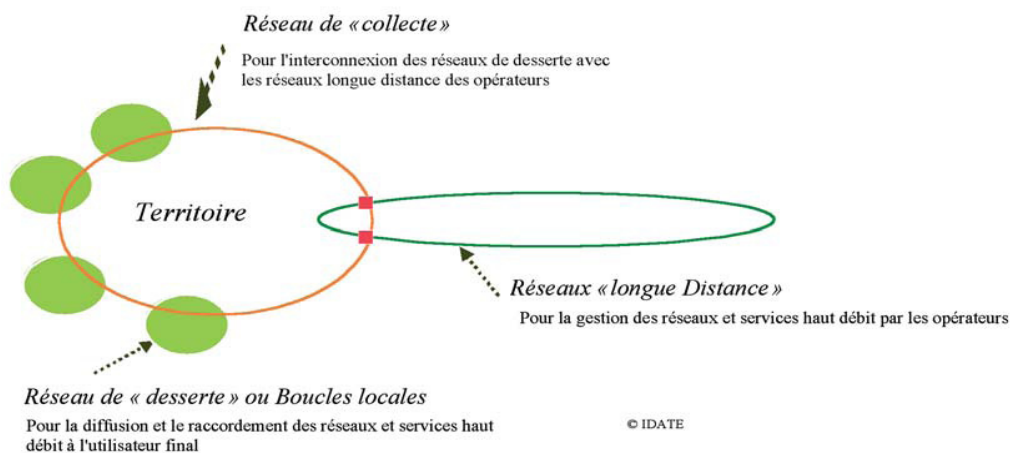


Figure 18. Technologies de collecte et de desserte (IDATE, 2006)

Une fois ces couples technologie desserte ou collecte choisies, la phase suivante est de choisir le mode de connexion correspondant (figure 19).

Technologie	Collecte	Desserte
ADSL		*
Câble modem		*
CPL		*
Faisceau hertzien	*	*
Fibre optique	*	*
Laser		*
Satellite	*	*
Wi-Fi		*
WIMAX	*	*

Figure 19. Caractéristiques de desserte ou de collecte selon les technologies.

Le programme « Bourgogne numérique » propose de distinguer les offres actuelles de desserte en haut débit par la technologie ADSL, qui font émerger une fracture numérique des territoires, en trois catégories :

- les zones « dégroupées », sur lesquelles la ligne téléphonique abonnée est opérée physiquement de façon concurrentielle par plusieurs opérateurs, ce qui aboutit à un ratio débit/prix très intéressant (plus de 2 Mbs pour environ 20 € par mois) ;
- les zones « éligibles ADSL » où la ligne téléphonique, qui n'est pas dégroupée physiquement, supporte néanmoins la technologie ADSL, avec des débits généralement plus faibles et un degré moindre de concurrence (de 128kbs à 2 Mbs pour environ 30 € par mois) ;
- les zones « non éligibles ADSL », pour lesquelles non seulement la ligne téléphonique n'est pas dégroupée physiquement, mais qui en plus, ne peut pas supporter la technologie ADSL pour des raisons techniques (qualité de la ligne et distance par rapport au répartiteur téléphonique) et ce, même si son répartiteur téléphonique a été équipé pour l'ADSL²³.

En parallèle, le Conseil Général soutient la création de réseaux métropolitains en fibre optique à très haut débit. De telles infrastructures sont actuellement en cours d'aménagement sur les villes de Valence et Romans, voire au sein de la zone d'activité de Rovaltain.

2.3. Desserte à Haut Débit au sein d'un département français (la Drôme)

La répartition des NRA (Nœuds de Raccordement d'Abonnés) de France Télécom (FT) est un bon indicateur pour envisager la densité de service Internet. Le NRA est le point central de la diffusion des réseaux au niveau local et de la fibre optique pour un espace géographique donné. Dans le département de la Drôme, il y a 128 NRA au total et seulement 62 NRA qui sont dégroupés²⁴. La capacité des NRA est différente selon le nombre de lignes à desservir (figure 20).

²³ www.cr-bourgogne.fr/download.php?voir=0&document_id=1147 2001

²⁴ 16 NRA sont dégroupés par SFR, 27 NRA par Free, 14 NRA par Bouygues et 5 NRA par Complete.

	Drôme
NRA de taille minimale 0-1000 lignes	69 NRA soit 53,91% des NRA du département
NRA de petite taille 1500-2000 lignes	31 NRA soit 24,22% des NRA du département
NRA de taille moyenne 2500-9500 lignes	24 NRA soit 18,75% des NRA du département
NRA de grande taille 10000-19500 lignes	1 NRA soit 0,78% des NRA du département
NRA de zone dense Plus de 20000 lignes	3 NRA soit 2,34% des NRA du département

Figure 20. Répartition des NRA par classe de nombre de lignes (ARIASE, 2010)²⁵

L'installation de cette boîte centrale dépend du nombre de clients, mais aussi de la position stratégique du répartiteur. Chaque commune peut être desservie par plusieurs NRA (1 à 7 NRA). D'après ARIASE, 78% des communes drômoises sont desservies par 1 ou 2 NRA et seulement 8% de ces communes font partie d'une unité urbaine. En revanche, sur les 19% de communes drômoises desservies par 3 ou 4 NRA, 27% de ces communes sont dans des unités urbaines. Les communes drômoises les mieux desservies sont couvertes par 5 à 7 NRA, ce qui reste rare puisque cela représente 1,6 % de la totalité des communes (6 communes). La carte suivante montre le nombre de NRA desservant chaque commune du département de la Drôme (figure 21).

²⁵ La capacité de chaque central téléphonique en nombre de lignes est une valeur arrondie à 500 lignes près. Les données proviennent de France Telecom.

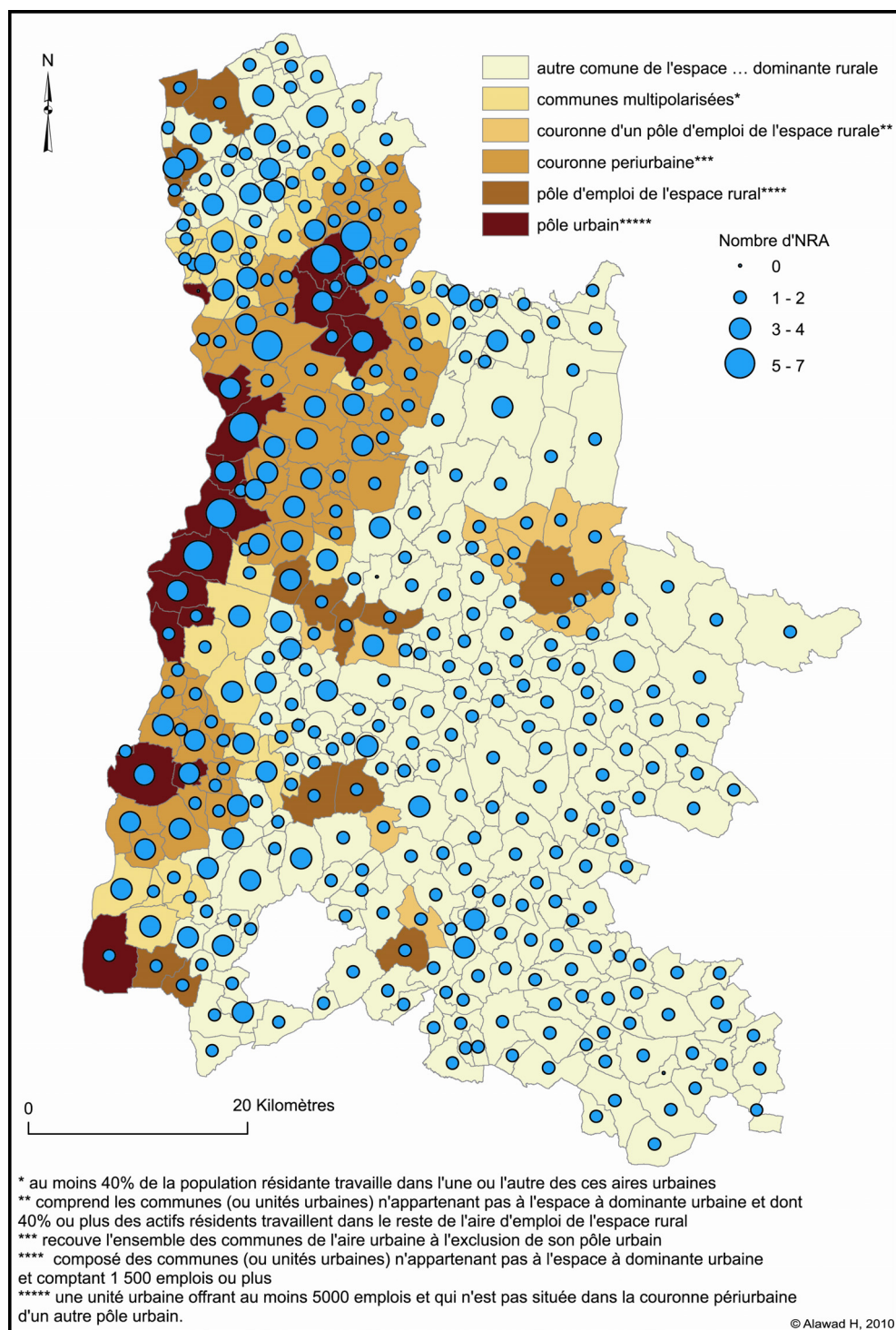


Figure 21. Nombre de NRA selon la nature urbaine ou rurale des communes de la Drôme.

Généralement, les taux d'éligibilité à l'ADSL sont très inégaux sur le territoire français. Que l'on étudie ces disparités à l'échelle des départements ou à celle des communes, le constat est le même : les zones rurales sont les moins bien desservies, en raison de la nature même du réseau de France Telecom. L'accès à Internet dans les zones urbaines progresse plus rapidement (très haut débit) parce qu'il s'agit de territoires densément peuplés où les investissements sont rentables alors que les zones rurales ou zones dites «blanches», souffrent de l'effet du manque du « dernier kilomètre » (Tchehouali, 2009). En raison d'une densité de population plus faible l'éloignement moyen entre le domicile des abonnés et leur central téléphonique y est nettement supérieur et pénalise d'autant plus les internautes (ARIASE, 2009).

La carte suivante montre le taux d'éligibilité des lignes téléphoniques par commune du département de la Drôme. Ce chiffre correspond au rapport entre le nombre de lignes pouvant au moins accéder à une offre haut débit de France Télécom, et le nombre total de lignes sur la zone considérée. D'après France Télécom (2009), 60% des communes drômoises (222 communes) ont un taux de 95% d'éligibilité au HD. En revanche, 15,2 % des communes (56 communes) ont un taux d'éligibilité inférieur à 50% (figure 22).

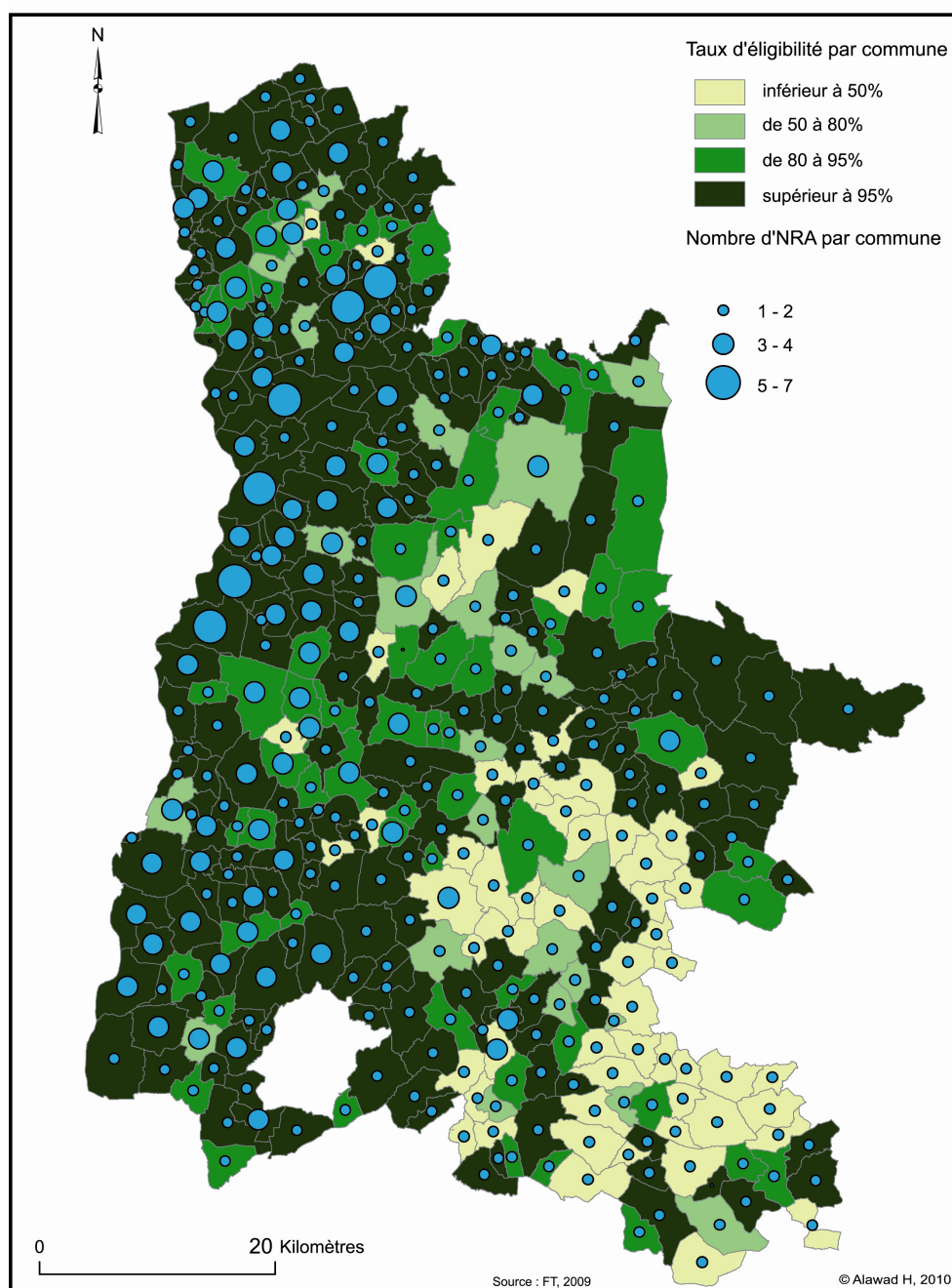


Figure 22. Taux d'éligibilité à au moins une offre ADSL de France Télécom dans le département de la Drôme.

2.4. Modes de connexion à Internet

En France, la connexion à Internet devient de plus en plus à haut débit. 96% des personnes disposent d'une connexion Internet à leur domicile ont le haut débit. La généralisation du haut débit a donc été très rapide. La plus grande partie de ces connexions se fait chez les particuliers : 94% des personnes déclarant disposer d'une connexion à haut débit

déclarent que leur liaison s'effectue par l'ADSL, contre seulement 5% par câble en juin 2008 (CREDOC²⁶, 2008) (figure 23).

	Juin 2004			Juin 2005			Juin 2006			Juin 2007			Juin 2008		
	18 ans et plus	12-17 ans	Ens.	18 ans et plus	12-17 ans	Ens.	18 ans et plus	12-17 ans	Ens.	18 ans et plus	12-17 ans	Ens.	18 ans et plus	12-17 ans	Ens.
. Par une ligne ADSL	92	92	92	93	97	93	95	96	95	95	94	95	94	97	94
. Par le câble	7	5	7	6	3	5	4	3	4	4	5	4	6	3	5
. Par le satellite	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
. Par un autre moyen	1	2	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0
Total (yc nsp)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Figure 23. Modes de connexion à haut débit chez les particuliers (en %) (CREDOC, 2008)

Pour bien comprendre la fonctionnalité de cette technologie d'Internet, il est important de connaître les différentes technologies disponibles, ainsi que leurs avantages et inconvénients. C'est en se basant sur ce principe que vont être étudiés ces techniques, avec un rendu présenté sous forme synthétique²⁷.

2.4.1. Les technologies filaires

2.4.1.1. Le RTC: le réseau téléphonique commuté

C'est le mode d'accès le plus fréquemment utilisé pour accéder à Internet ; c'est un réseau de téléphone traditionnel sur paire de cuivres, fonctionnant en mode analogique pour transporter exclusivement la voix humaine. Le spectre de fréquences reconnues a été limité à 4 kHz et fournit un débit théorique de 56 kb/s. Il est nécessaire d'utiliser un modem car le raccordement par ligne téléphonique classique n'est pas permanent. Ce mode d'accès était disponible pour 34 millions d'abonnées au téléphone à la fin de l'année 2002 et il connaît peu de variation depuis quelques années.

²⁶ Centre de Recherche pour l'Etude et l'Observation des Conditions de vie

²⁷ Les informations de la partie suivante sont issues de plusieurs sites des sources : l'ART, la FING, l'Idate, www.francetelecom.fr, www.telecom.gouv.fr, www.telecomville.org, www.ant.developpement-durable.gouv.fr et www.territoires.gouv.fr

2.4.1.2. L'Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL)

Cette technologie permet une connexion haut débit et elle fait partie de la famille des xDSL (Berret, 2008). Cet ensemble de technologies utilise le cuivre comme support physique, mais diffère par le nombre de lignes utilisées et les débits offerts. L'asymétrie signifie que le débit des données montantes (ou envoyées) est différent de celui de données descendantes (ou reçues). La bande des fréquences dédiées se situe entre 4Khz et 700 kHz pour les données montantes avec un débit allant jusqu'à 512Kb/s, et de 700 KHz à 1,1 Mhz pour les données descendantes, avec un débit pouvant aller jusqu'à 10 Mb/s. Ces débits sont fonction de la distance (la distance maximum entre l'abonné et le central est de 5 km) ainsi que de la qualité de la ligne et du diamètre du câble (figure 24).

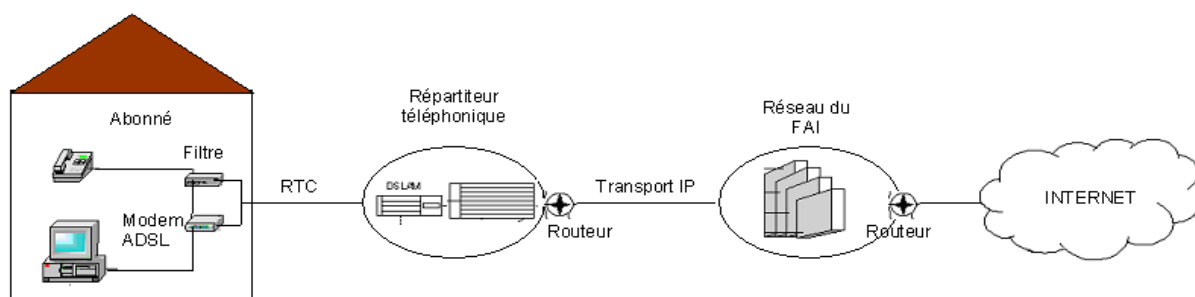


Figure 24. Schéma de fonction de l'ADSL (France Télécom, 2008)

L'ADSL représente 94% du marché de l'accès Internet haut débit. Actuellement en France, le nombre de connexions ADSL est proche de 50% du nombre de lignes téléphoniques (11.980 milliers lignes 2006). Au 1^{er} janvier 2008, selon l'Autorité de Régulation des Communications Electroniques et des Postes (ARCEP), 15,5 millions d'abonnement à l'Internet haut débit sont dénombrés en France pour les particuliers et les entreprises, dont 14,8 millions d'abonnements ADSL, ce qui situe la France au 8^{ème} rang des pays de l'UE, avec une moyenne de 22,3 abonnements pour 100 habitants, se situant juste après le Royaume-Uni, mais devant l'Allemagne, l'Espagne et l'Italie.

L'offre ADSL s'appuie sur le réseau RTC existant et ne nécessite pas de lourds investissements comme la pose de nouveaux câbles par exemple. En plus, la ligne téléphonique reste disponible pendant la connexion à Internet. Par contre, il est nécessaire d'installer certains équipements (DSLAM) dans les répartiteurs du RTC (13724 sites en France). Pour chaque DSLAM, France Télécom (l'opérateur historique en France) s'ouvre à

la concurrence avec les autres opérateurs télécoms qui fournissent des lignes téléphoniques par Internet (notion de dégroupage). Le dégroupage permet aux opérateurs de relier leurs propres réseaux au réseau national, celui-ci restant à la propriété de France Télécom (FT).

Les opérateurs dégroupés présents en France, comme Free, 9Télécom ou Cégétel, communiquent sur leur site Web l'avancée du dégroupage, par région et par ville. On peut alors distinguer deux types de dégroupage (figure 25) :

- Le dégroupage partiel permet à un opérateur d'avoir accès à la bande de fréquence "haute" (fréquences non vocales) de la paire de cuivre. Moins coûteuse que le dégroupage total, cette solution permet aux opérateurs de proposer et de gérer de bout en bout la connexion ADSL. La partie téléphonie (fréquences "basses") reste exclusivement gérée par France Télécom.
- Le dégroupage total permet à un opérateur de proposer la totalité de la bande de fréquence de la paire de cuivres. L'ensemble des services Internet et téléphonie est alors exclusivement géré par l'opérateur alternatif et non plus par France Télécom

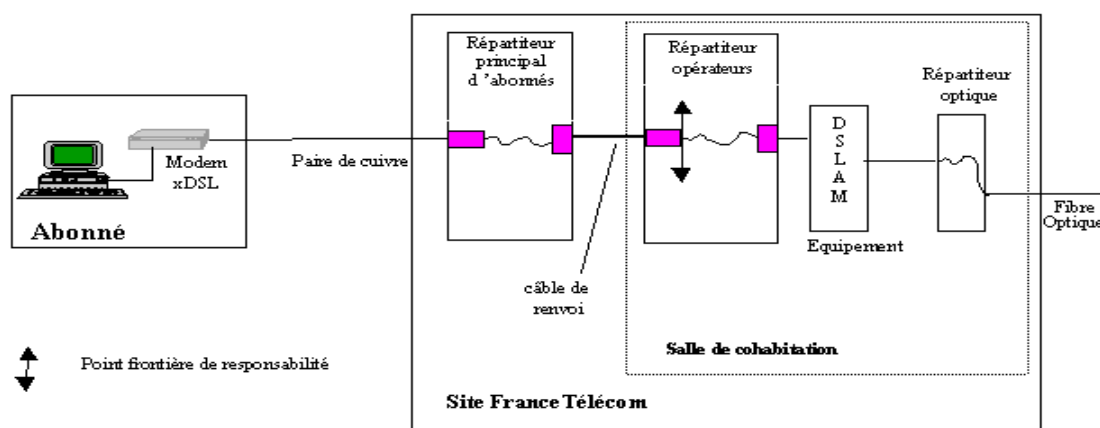


Figure 25. Le dispositif technique de dégroupage (France Télécom, 2008)

Le nombre de lignes dégroupées atteint 7,5 millions à la fin du troisième trimestre 2009, soit plus de 21% de l'ensemble des lignes fixes. Le dégroupage total connaît une croissance soutenue (+31,1% sur un an au troisième trimestre 2009). Trois lignes dégroupées sur quatre (soit 4,5 millions) sont désormais totalement dégroupées et leur nombre s'est accru de 1,3 million en un an (ARCEP, 2010). Le nombre de lignes partiellement dégroupées était de 1,4 million de lignes à la fin du troisième trimestre 2009.

En théorie, l'ADSL est la solution la plus à même de permettre un déploiement du haut débit puisqu'elle utilise un réseau déjà existant. Il ne reste qu'à adapter les répartiteurs pour l'ADSL. Dans la pratique, cela ne pose généralement pas de problème dans les grandes villes et les moyennes communes périurbaines. En revanche, les communes rurales, moins peuplées, vont encore être des espaces délaissés, car ils vont souffrir de l'éloignement du répartiteur. L'ADSL ne permet de desservir que des abonnés situés à moins de 5 km du répartiteur, avec une chute brutale entre 1 et 3 km, le taux d'affaiblissement de la ligne étant trop élevé au-delà (figure 26).

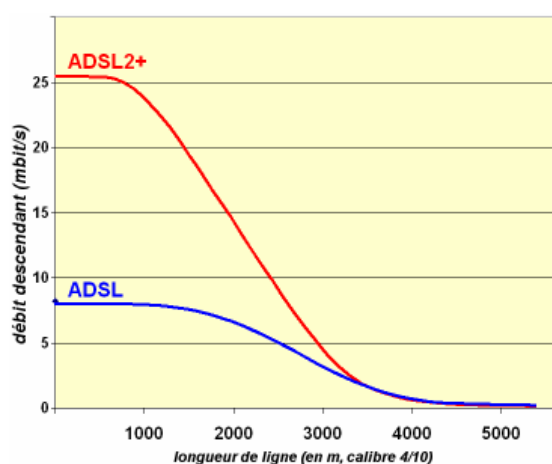


Figure 26. Débit descendant en fonction de la longueur de ligne en fibre optique (FT, 2008)

« La France bénéficie désormais d'un taux d'équipement parmi les plus élevés d'Europe pour l'accès à Internet haut débit, grâce à la mise en œuvre effective du dégroupage qui a permis la concurrence et l'innovation. Ainsi la France comptait au 30 septembre 2008 plus de 17 millions d'accès à Internet haut débit, dont plus de 8 millions ne disposent plus d'abonnement au service téléphonique traditionnel. Au totale, le haut débit fixe par ADSL est aujourd'hui accessible à 98,3% de la population » (Assemblée Nationale, 2009).

2.4.1.3. Le câble

Les réseaux câblés peuvent aussi fournir des services de communication : accès à Internet haut débit et téléphone, en plus des chaînes de télévision. Par construction, le câble est généralement asymétrique et sa structure est arborescente, ce qui entraîne une certaine variabilité du débit. Son intérêt est donc avant tout domestique. En général, ce sont les zones résidentielles qui sont desservies et rarement les zones d'activités. Les débits des offres

d'accès à Internet atteignent 2Mbit/s pour la voie descendante et 500Kbit/s ou 1Mbit/s pour la voie montante. En 2005, le nombre d'abonnés à Internet était de 454 000²⁸.

L'avantage du câble est l'utilisation des infrastructures existantes de réseaux de télévision câblés, ce qui évite des coûts d'installation supplémentaire. En revanche, le câble a des contraintes, consistant notamment en une bande passante limitée et qui doit être partagée entre plusieurs utilisateurs simultanément (ce qui limite le volume de données téléchargeables en voie descendante) ainsi qu'une couverture limitée qui, dans la pratique, est réservée quasi exclusivement aux populations des moyennes et grandes agglomérations. Le nombre d'abonnements Internet par ADSL s'élève à 16,3 millions à la fin du troisième trimestre 2008, soit 2,2 millions de plus qu'un an auparavant. Plus d'un tiers de ces abonnés accèdent désormais à un service de télévision par ADSL. Le nombre d'abonnements a atteint 5,6 millions à la fin du troisième trimestre 2008 et s'est accru de 1,6 million en un an (figure 27).

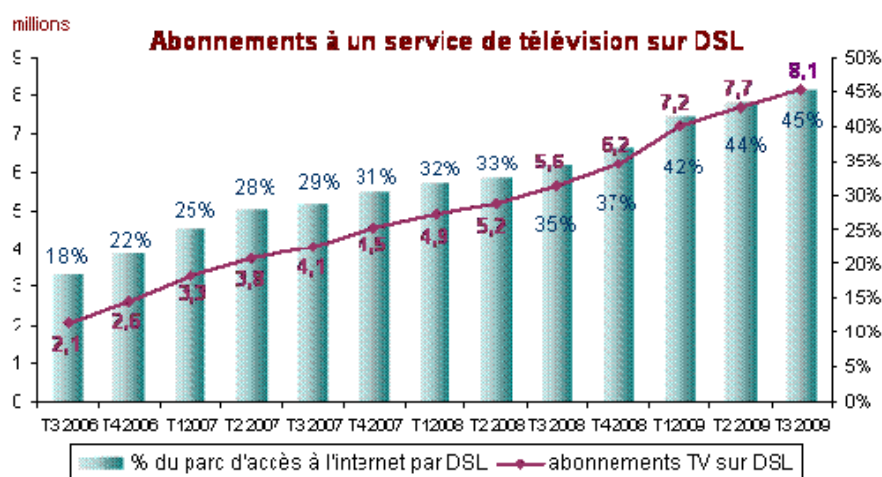


Figure 27. Evolution du nombre d'abonnements à un service de télévision sur DSL (ARCEP, 2010)

2.4.1.4. La fibre optique

Une fibre optique est un fil en verre ou en plastique très fin qui a la propriété de conduire un signal lumineux, issu de la conversion d'une information électrique, à l'intérieur d'un canal. Il en existe plusieurs types qui transmettent la lumière avec plus ou moins de perte du signal. La transmission est de l'ordre du Gbit/s, ou plus. Cette technologie permet ainsi d'avoir le VTHD (Vraiment Très Haut Débit).



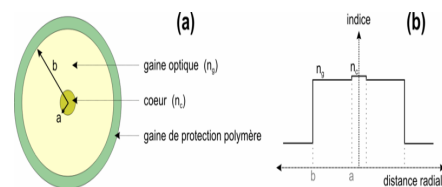
²⁸ source : art-telecom.fr

Le plus gros avantage de cette technologie est sa bande passante bien supérieure à celle que l'on peut obtenir avec un câble électrique. La distance couverte sans la nécessité d'installer un amplificateur est aussi beaucoup plus importante. Enfin, l'atténuation du signal est inférieure à celle d'un conducteur électrique. Son inconvénient majeur est le coût d'installation des convertisseurs d'énergie électrique/lumineuse.

La fibre optique est composée de trois éléments : le cœur dans lequel se propage le signal lumineux, la gaine protectrice réfléchissante qui enferme le signal dans le cœur et lui permet de se propager et un revêtement de protection mécanique de la fibre. La fibre, ou brin, sera ensuite regroupé avec d'autres au sein d'un câble.

Trois types de configurations sont possibles :

- FTTH (fibre to the home) : la fibre optique dessert directement les utilisateurs ;
- FTTB (fibre to the building) : la fibre optique dessert le bas des immeubles ;
- FTTC (fibre to the curb) : la fibre optique s'arrête au dernier répartiteur.



En 2007, il y avait 33 millions d'abonnés à la fibre optique dans le monde. 85% en Asie, dont 13,3 au Japon. L'Amérique du Nord arrive en deuxième position, avec par exemple 2.3 millions d'abonnés aux Etats-Unis. L'Europe apparaît distancée mais les choses changent depuis 2008. Les Pays-Bas, l'Allemagne et la France notamment commencent à rattraper l'Italie et la Suède, les pays pionniers en la matière sur le continent (figure 28).

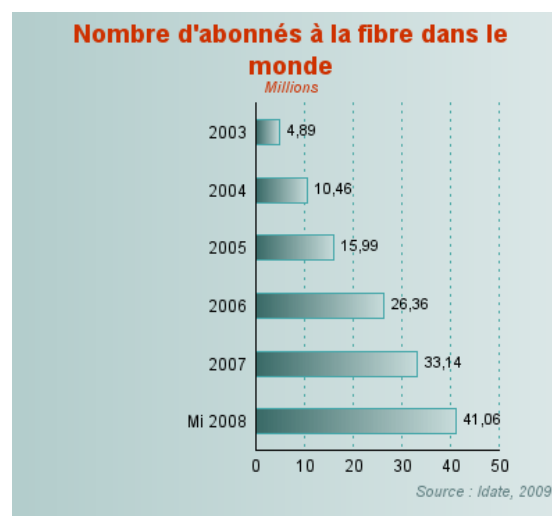


Figure 28. Marché de la fibre optique dans le monde (IDATE, 2009)

2.4.1.5. 2.4.1.5. Le courant porteur en ligne (CPL)

Ici le réseau de collecte doit passer par les transformateurs d'électricité d'EDF. Le signal circule ensuite jusqu'à la maison du particulier par les lignes de courant électrique sur le réseau basse tension. Une expérimentation de ce type a été lancée par le SIPPEREC (Syndicat intercommunal de la Périphérie de Paris pour l'Électricité et les Réseaux de Communication) sur la région parisienne.

Cette technologie existe depuis de très nombreuses années, mais elle est limitée à une utilisation à bas débit et pour des applications de télécommande de relais, pour l'éclairage public ou la domotique (ensemble des technologies de l'électronique, de l'informatique et des télécommunications utilisées dans les habitations). En utilisant la technologie CPL, il est possible : 1) de faire passer des données informatiques à haut débit et ainsi étendre un réseau local existant, ou 2) de partager un accès Internet existant via les prises électroniques grâce à la mise en place de boîtiers spécifiques.

La mise en œuvre d'un réseau CPL doit se faire avec le concours du distributeur d'électricité du pays concerné, pour notamment toute la partie liée à l'injection du signal au niveau des transformateurs. Mais surtout, il n'y a pas encore vraiment d'acteur de taille suffisante pour la développer en France. Elle permettrait théoriquement d'obtenir des débits de plusieurs dizaines de Mb/s.

2.4.2. Les technologie non filaires

2.4.2.1. La Boucle Locale Radio (BLR)

Cette technologie permet d'accéder à l'Internet haut débit et à des services de téléphonie. Elle constitue le dernier segment du réseau d'un opérateur et relie directement l'abonné et les centraux téléphoniques fixes à son réseau sans passer par les fils de cuivre, en utilisant une liaison radio hertzienne.

Deux bandes de fréquence sont disponibles :

- 3.5 GHz (la technologie MMDS) : elle permet d'avoir une zone de couverture de 10 km de rayon, mais la bande de fréquence attribuée et relativement réduite (15 MHz) permettant des débits de 16Mbit/s. Elle convient donc aux zones de faible densité de population ;

- 26 GHz (la technologie LMDS) : la zone de couverture est de 5 km de rayon. En revanche, la bande allouée est plus importante (112 MHz) et permet d'atteindre des débits de 34 Mbit/s. Elle convient bien aux zones urbaines à forte densité de population.

L'avantage de la BLR est évident pour les pays en voie de développement où le réseau filaire est inexistant. Les autres avantages de la BLR sont la rapidité du déploiement de ce système, dès qu'une station de base est installée. De plus, l'équipement de l'abonné est réutilisable par un autre utilisateur après la résiliation d'un abonnement. En revanche, les limites de cette technologie consistent dans une obligation de visibilité entre les points d'émission et de réception. Le relief, les précipitations fortes et les obstacles (arbres, bâtiment, etc.) peuvent altérer les performances. Le coût des terminaux d'abonnés est assez élevé, ce qui peut restreindre les cibles de marchés dans les premières étapes de déploiement.

2.4.2.2. La famille des réseaux locaux radioélectriques (RLAN) : le Wi-Fi

Le Wi-Fi est une technologie de réseau local sans fil qui permet de couvrir une zone sur un rayon de plusieurs dizaines de mètres. Dans la pratique, le Wi-Fi permet de relier des ordinateurs à Internet haut débit (11 Mbit/s avec la norme 802.11b et 54 Mbit/s en 802.11g) sur un rayon pouvant atteindre des centaines de mètres, voire plusieurs kilomètres dans des conditions parfaites (réception et émission à vue sans obstacle). Le Wi-Fi utilise la gamme de fréquence de 2.4GHz, la même que celle des fours à micro-ondes. La distance de portée est variable selon le débit théorique, (figure 28), en intérieur ou à l'extérieur de chez l'utilisateur (Diaconesco, 2008).

Débit théorique	Portée (en intérieur)	Portée (à l'extérieur)
54 Mbits/s	27 m	75 m
48 Mbits/s	29 m	100 m
36 Mbits/s	30 m	120 m
24 Mbit/s	42 m	140 m
18 Mbit/s	55 m	180 m
12 Mbit/s	64 m	250 m
9 Mbit/s	75 m	350 m
6 Mbit/s	90 m	400 m

Figure 29. Débit théorique du Wi-Fi et sa portée, à l'extérieur ou en intérieur (Diaconesco, 2008)

La norme Wi-Fi (802.11g) permet d'obtenir un débit théorique de 54 Mbit/s pour des portées équivalentes à celles de la norme la plus répandue actuellement (802.11b) qui est de 11Mbit/s. Cette norme est compatible avec les matériels 802.11b, à l'exception de certains anciens matériels (figure 30).

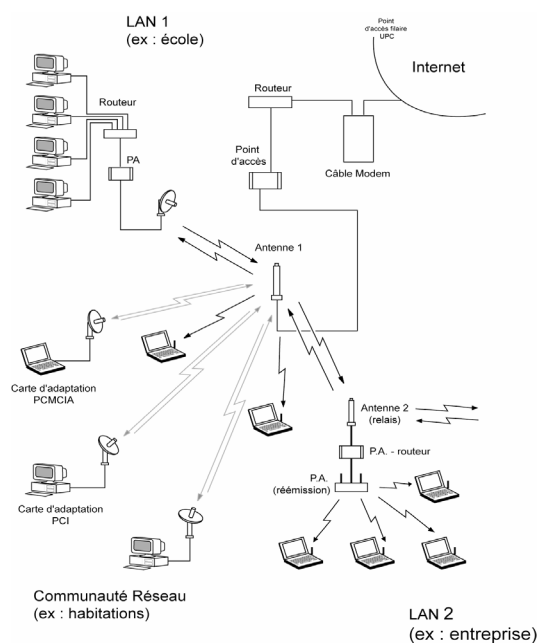


Figure 30. Principe de fonctionnement du Wi-Fi

Il existe deux modèles de déploiement du Wi-Fi :

- Le mode infrastructure : c'est un mode de fonctionnement qui permet de connecter les ordinateurs équipés d'une carte réseau Wi-Fi entre eux, via un ou plusieurs points d'accès qui agissent comme des concentrateurs. Il est essentiellement utilisé en entreprise. La mise en place d'un tel réseau oblige à poser à intervalles réguliers des points d'accès dans la zone qui doit être couverte par le réseau.
- Le mode « Ad-Hoc » : c'est un mode de fonctionnement qui permet de connecter directement les ordinateurs équipés d'une carte réseau Wi-Fi, sans utiliser un matériel tiers tel qu'un point d'accès. Ce mode est idéal pour interconnecter rapidement des machines entre elles, surtout sans matériel supplémentaire (figure 31).

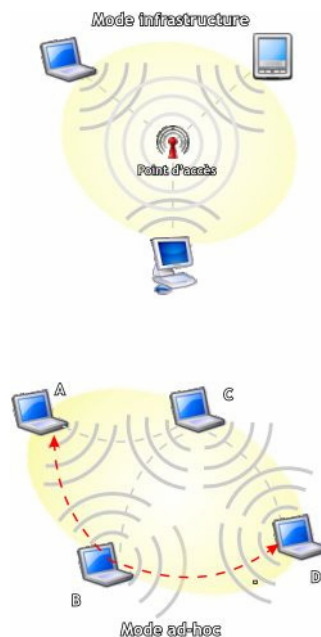


Figure 31. Deux modes de déploiement de la technologie de Wi-Fi (ANT²⁹, 2007)

Déployer un réseau sans fil Wi-Fi présente des avantages et des inconvénients :

Avantages :

- *Mobilité* : les utilisateurs sont généralement satisfaits des libertés offertes par un réseau sans fil et de fait sont plus enclins à utiliser le matériel informatique. Le Wi-Fi

²⁹ Atelier Aménagement Numérique de Territoires

peut aussi répondre à l'usage de l'Internet sans fil dans la sphère domestique en permettant de partager un accès Internet à partir d'une même connexion ;

- *Facilité et souplesse* : un réseau sans fil peut être utilisé dans des endroits éphémères, il peut couvrir des zones difficiles d'accès aux câbles, et relier des bâtiments distants ;

- *Coût* : si leur installation est parfois un peu plus coûteuse qu'un réseau filaire, les réseaux sans fil ont des coûts de maintenance réduits ; sur le moyen terme, l'investissement est facilement rentabilisé ;

- *Évolutivité* : les réseaux sans fil peuvent être dimensionnés au plus juste, évoluant en fonction des besoins et des demandes.

Inconvénients :

- *Qualité et continuité du signal* : ces notions ne sont pas garanties du fait des problèmes pouvant venir des interférences, du matériel et de l'environnement ;

- *Sécurité* : la sécurité des réseaux sans fil n'est pas encore tout à fait fiable du fait que cette technologie est relativement novatrice.

Le Wi-Fi peut être utilisé pour supporter des accès à Internet en haut débit dans certaines zones rurales, car il permet de bénéficier de la disponibilité d'équipements bon marché et de s'affranchir des coûts éventuels de licence radio en utilisant une bande libre. Il s'agit d'usages liés à la desserte haut débit d'abonnés fixes, lorsque le service DSL n'est pas disponible. Par ailleurs, le Wi-Fi peut parfois être utilisé comme une solution de collecte, pour raccorder des points de concentration d'où partent des liaisons de desserte Wi-Fi en étoile.

2.4.2.3. Le Wimax

Comme le Wi-Fi, la technologie Wimax s'appuie sur les ondes radio pour transporter l'information. C'est une technologie de communication électronique haut débit sans fil, créée en 2002. Basé sur le standard IEEE 802.16, elle offre un débit en théorie de 70Mbit/s, en pratique 15 à 25Mbit/s, par des ondes radio. La bande de fréquence ouverte s'étend de 3,4GHz à 3,6GHz.

Contrairement au Wi-Fi, destiné à la mise en place de réseaux locaux, le Wimax est conçu dans un esprit de couverture de surfaces importantes, avec un rayon géographique couvrant 10 à 20 km autour de l'émetteur principal (la station de base).

Une des caractéristiques de cette technologie est que dans les premiers kilomètres, elle n'oblige pas à être en vue de l'équipement et tolère un pointage « approximatif » (Diaconesco, 2008). Cette technologie permet de mettre en place une liaison point à multipoint : à partir d'une antenne centrale, on assure ensuite la desserte de multiples terminaux.

Comme toute technologie sans fil, sa mise en service nécessite une source d'alimentation (par exemple la fibre optique ou le satellite...). La station de base est placée sur un point haut (pylône, château d'eau, église, mairie...). Le Wimax assure une transmission sans ligne de vue (c'est-à-dire même lorsque des obstacles tels que des arbres se trouvent entre l'émetteur et le récepteur), mais cela réduit notablement la portée maximale d'émission. Chez l'abonné, une antenne Wimax assure aussi la liaison entre l'émetteur du secteur et l'équipement connecté (ordinateur ou autre).

Cette technologie permet de desservir en haut débit les zones peu denses, mal desservies en réseaux filaires comme les zones rurales, mais aussi les zones où des travaux de génie civil seraient très coûteux en milieu urbain (lié à une trop forte densité du bâti). Le Wimax permet d'atteindre des distances supérieures avec une moindre sensibilité aux obstacles, et offre également une alternative d'accès intéressante, mais à des coûts plus élevés que les technologies Wi-Fi.

2.4.2.4. Le satellite

C'est aujourd'hui l'une des technologies les plus utilisées par les particuliers qui ne peuvent ni profiter de l'ADSL ni encore du WIMAX. Le débit d'un réseau satellitaire peut théoriquement atteindre 155Mbit/s, mais se situe en moyenne aux alentours de 55Mbit/s, car la liaison est habituellement mutualisée pour un meilleur rapport qualité/prix. L'accès haut débit par satellite couvre l'intégralité du territoire et connaît un déploiement rapide. Outre, les actuels forfaits haut débit utilisant la technologie bidirectionnelle, il ne faut pas oublier que l'accès satellite peut être centralisé sur un récepteur dans une commune puis être partagé *via* un réseau Wi-Fi.

Comment fonctionne le haut débit par satellite ? Un émetteur satellite relié au réseau de collecte (fibre optique d'un fournisseur) envoie un signal à un satellite de télécommunications géostationnaire. Ce satellite fait office de relais entre le réseau de collecte au sol et la commune bénéficiant de l'installation satellite. En mode unidirectionnel, la réception de données se fait en haut débit via le satellite, mais en émission, la connexion utilise le réseau téléphonique RTC à une vitesse maximum de 56 kbit (bas débit). Par ailleurs, en mode bidirectionnel, l'accès haut débit est bien en haut débit, mais les coûts d'installation du matériel et le tarif prohibitif de l'abonnement est une réelle barrière (figure 32).

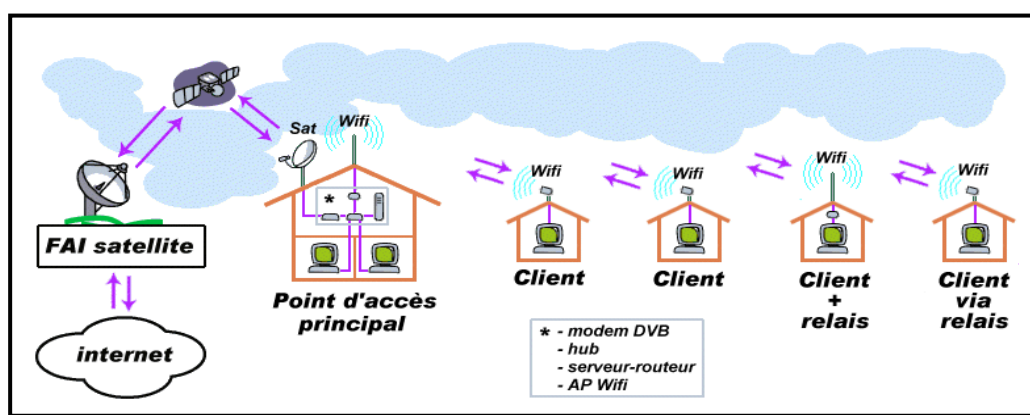


Figure 32. Le principe de connexion par satellite (Lebrun, 2003)

Une étude de l'IDATE³⁰ aborde les récents développements observés aux Etats-Unis, en Asie et en Europe. Elle a procédé à une analyse des problématiques liées à l'introduction de ces services, et a évalué les opportunités liées à leur déploiement en accès fixe pour le secteur résidentiel en Europe et en Afrique du Nord. Le haut débit par satellite redevient d'actualité et la bande Ka a fait son apparition en 2005, ce qui, malgré quelques contraintes techniques, permet un "renouveau" du haut débit par satellite grâce à un modèle économique beaucoup plus favorable que celui lié à la bande Ku. Le Mo (méga-octet) est facturé 4 à 10 fois moins cher en bande Ka qu'en bande Ku, grâce à la capacité des satellites qui a été multipliée par un facteur 70 en quelques années, à prix égal. Le prix des terminaux est passé de 2 000 euros en 2004 à 350 euros fin 2008 (IDATE, 2008).³¹

³⁰ Institut De l'Audiovisuel et des Télécommunications en Europe

³¹ www.idate.org

Le marché du haut débit par satellite en bande Ka est un marché qui devrait enregistrer une croissance importante dans les années à venir, notamment par le biais de vastes plans gouvernementaux. Le retour de l'accès haut débit satellitaire a été rendu possible par une réduction massive du prix des terminaux. Face à la concurrence des technologies terrestres sans fil (3G et Wimax), la technologie satellitaire devra mettre en avant ses atouts, le principal étant certainement une disponibilité immédiate pour un coût modéré. L'IDATE a analysé des scénarios stratégiques correspondant à quatre zones géographiques établies en fonction de critères clés qui permettant de mieux appréhender le positionnement à adopter dans chacune pour une offre d'accès haut débit par satellite.

2.4.2.5. Le téléphone mobile

L'IDATE indique que la téléphonie mobile compte 4.2 milliards d'abonnés en 2009 dans le monde. 1.9 milliards des abonnés vivent dans des pays asiatiques, soit deux fois plus que les abonnés européens. Le marché nord-américain semble en retard, avec seulement 311 millions d'abonnés (figure 33).

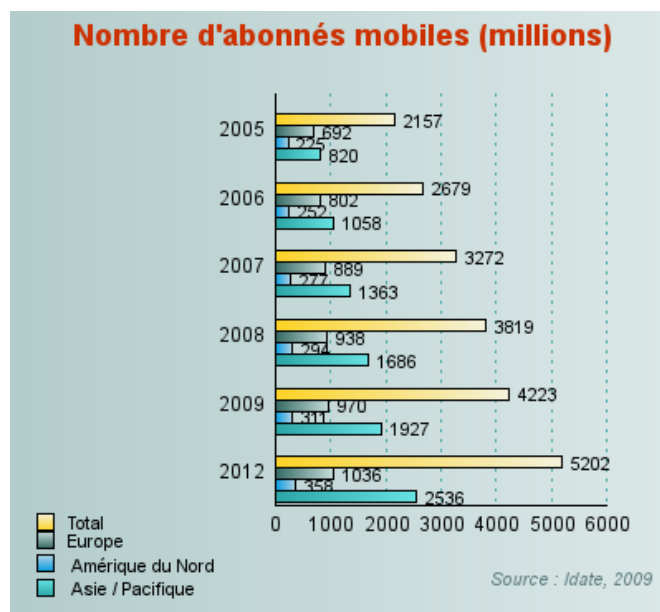


Figure 33. Nombre d'abonnés au téléphone mobile dans le monde (IDATE, 2009)

Le nombre d'utilisateurs de la téléphonie mobile en France (nombre de cartes Sim en service) est seulement de 59,7 millions (chiffres pour la fin du troisième trimestre 2009). Ce nombre s'est accru de 3,3 millions sur un an, soit une augmentation annuelle de 6%.

L'Internet et l'e-mail mobile restent relativement peu utilisés dans la pratique, en raison d'un faible débit (maximum est de 115Kbit/s), dans les connexions et d'un nombre limité de sites accessibles (figure 34).

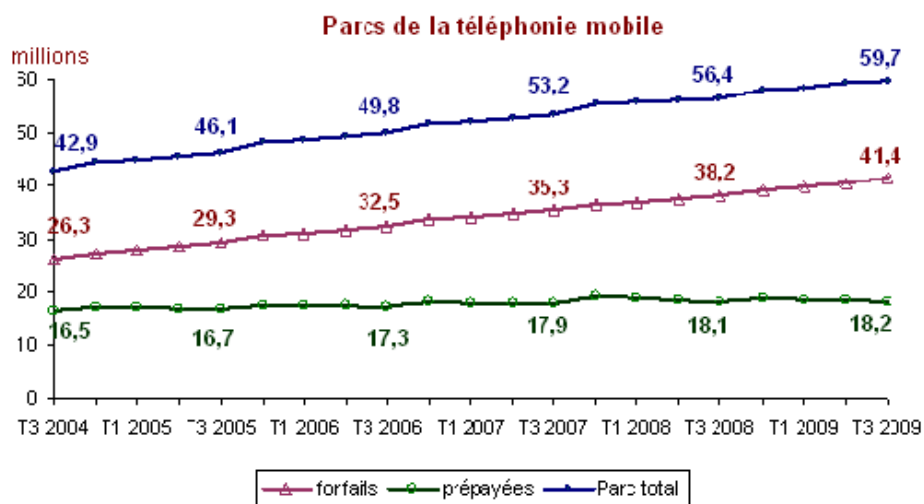


Figure 34. Marché de la téléphonie mobile en France (ARCEP, 2010)

La bande de fréquence ouverte s'étend de 900MHz à 1800 MHz. En matière de connexion à l'Internet cette technologie a permis le WAP (Wireless Application Protocol). Par contre, la nouvelle génération de mobiles permet la convergence d'Internet et de la téléphonie mobile, et offre, aux usagers des territoires couverts, la possibilité de se connecter en toute liberté avec un débit supérieur au WAP. La bande de fréquence ouverte ici s'étend de 1920MHz à 2170MHz.³²

Le nombre de mobinautes augmente de façon significative (figure 35). Au troisième trimestre 2009, 16% des français disposent d'un Smartphone parmi lesquels 72% se déclarent utilisateurs d'Internet mobile. Fin décembre 2009, on dénombre 11,4 millions de mobinautes en France. La part des accès à Internet via PC reste dominante, celle des accès mobiles augmente pour représenter près de 2% des visites de sites (Médiamétrie, 2010).

³² Les informations de cette partie sont issues de plusieurs sources : l'ART, l'ARCP, l'ARIAS, le Senat, Altivis, degroupnews, Internetworldstats, JournalduNet, telecom.gouv, eurostat, ant.equipement

Parc actif multimédia, parc actif 3G, cartes Internet (en millions)	T3 2008	T4 2008	T1 2009	T2 2009	T3 2009	Variation 3T09/3T08
Parc actif multimédia mobile	17,449	19,143	19,905	20,177	20,755	18,9%
Parc actif 3G	9,336	11,439	13,023	14,199	15,416	64,8%
Nombre de cartes SIM Internet exclusives	0,821	0,597	1,201	1,467	1,756	114,0%

Figure 35³³. Nombre de mobinautes (ARCEP, 2010)

Les éléments en prendre en compte pour le déploiement d'un réseau Ethernet (filaire) sont la pose de prises Ethernet, les prix du switch ou hub et des cartes Ethernet. Concernant ces dernières, il faut distinguer les prix entre les cartes PCMCIA³⁴ et les cartes PCI³⁵ ou ISA³⁶ pour connecter des cartes d'extension à la carte mère d'un ordinateur, qui reviennent nettement moins chères. Dans le cas d'un réseau sans fil, les paramètres à considérer sont le type de point d'accès, l'antenne et bien évidemment les cartes réseaux (PCMCIA ou PCI). Le prix d'un point d'accès varie 1) d'après les fonctionnalités dont il dispose et 2) de la gestion du protocole IEEE 802.1x (Jauvin, 2003).

La figure suivante présente un modèle professionnel utilisé pour comparer le prix de ces deux modes de connexion (filaire et non filaire) et qui montre un intérêt économique plus intéressant pour le réseau Wi-Fi que pour le réseau Ethernet (figure 36). L'installation d'un réseau non filaire comme le Wi-Fi est jusqu'à 75% moins cher qu'un réseau filaire.

³³ Note : - Le parc actif multimédia est défini par l'ensemble des clients (abonnés ou prépayés) qui ont utilisé au moins une fois sur le dernier mois un service multimédia de type Wap ; i-Mode ; MMS ; e-mail (l'envoi d'un SMS ne rentre pas dans le périmètre de cette définition), et ce, quelle que soit la technologie support (CSD, GPRS, UMTS...). Champ : Métropole et DOM.- Le parc actif 3G est défini comme le nombre de clients ayant accédé au cours des trois derniers mois (en émission ou en réception) à un service mobile (voix, visiophonie, Tv mobile, transfert de données...) utilisant la technologie d'accès radio 3G.- Le nombre de cartes SIM Internet exclusives est défini comme le nombre de cartes SIM vendues par les opérateurs mobiles (sous forme d'abonnement, forfait ou de cartes prépayées) et destinées à un usage Internet exclusif (cartes PCMCIA, clés Internet 3G / 3G+). Ces cartes ne permettent pas de passer des appels vocaux.

³⁴ Personal Computer Memory Card International Association

³⁵ Peripheral Component Interconnect

³⁶ Industry Standard Architecture

Estimation des coûts d'un réseau Ethernet*(la pose du câble et éléments actifs)*

Élément réseau Ethernet	Prix (en euro)*
Pose de prise Ethernet (câble)	250
Switch Ethernet	500
Carte Ethernet (PCMCIA, câble)	150
Carte Ethernet (PCI, câble)	30

* Référence prix moyen de modèle haut de gamme en entreprise

Estimation du coût d'un réseau IEEE 802.11b (Wi-Fi)*(éléments actifs et antenne)*

Élément réseau sans fil	Prix (en euro)*
Point d'accès	630
Antenne	75
Carte IEEE 802.11b (PCMCIA)	80
Carte IEEE 802.11b (PCI pour PC fixe)	95

* Référence catalogue FNAC juin 2003. AP modèle Colubris Network N3000. Antenne Patch 60°

Comparons le prix de revient d'un réseau de 30 nœuds en câble et en radio, en considérant que nous n'avons pas besoin d'un point d'accès. Dans le premier cas, nous avons 30 PC fixe de bureau (interface PCI) :

- Ethernet : $30 \times (250 + 30) + 500 = 8\ 900\ €$
- IEEE 802.11b Wi-Fi : $(30 \times 95) + 630 + 75 = 3555\ €$

Les coûts de déploiement de la solution Wi-Fi versus le déploiement habituel d'un réseau Ethernet filaire pour des postes fixes est **60% moins cher**.

Supposons maintenant que le réseau comprenne 30 PC portables (interface PCMCIA).

Le calcul donne :

- Ethernet : $30 \times (250 + 150) + 500 = 12\ 500\ €$
- IEEE 802.11b Wi-Fi : $(30 \times 80) + 630 + 75 = 3105\ €$

Cette fois, la solution **Wi-Fi est 75% moins cher**.

Figure 36. Comparaison économique des déploiements Ethernet filaire v.s. sans fil (Jauvin, 2003)

2.5. Les usages d'Internet

Les usages d'Internet apparaissent organisés autour de trois pôles (Donnat, 2007) :

- les fonctions d'échange de courriels, d'information et de documentation constituent en quelque sorte « l'Internet de base ». Elles sont utilisées par la grande majorité des internautes, même les occasionnels : ainsi, par exemple, 55% de ceux qui se sont connectés moins d'une fois par semaine au cours du dernier

mois l'ont fait pour rechercher des informations sur des biens et services et 43 % pour faire de la recherche documentaire;

- *les usages contribuent au renforcement de l'univers culturel juvénile. S'ils constituent une propriété relative des 15-24 ans, sans qu'on puisse faire la part de ce qui relève des effets de génération et du cycle de vie, ils ne concernent pas uniformément tous les jeunes : le fait de jouer est nettement masculin et concerne plutôt des personnes faiblement diplômées, de même qu'écouter ou télécharger de la musique ou un film ; le fait de vivre seul ou dans une famille monoparentale favorise (« toutes choses égales par ailleurs ») le recours à la messagerie instantanée et plus encore la participation à des chats ou forums;*
- *les usages liés à l'organisation de la vie quotidienne (administration, banque, préparation des vacances, achat de biens et services...), sont plutôt le fait d'internautes assidus d'âge intermédiaire, appartenant aux milieux favorisés et ayant un engagement important dans la culture, autant de propriétés qui font du temps une ressource particulièrement rare. De ce point de vue, la consultation en ligne de presse et, dans une moindre mesure, celle de musées ou d'expositions répond à la même logique d'usages.*

Selon une étude faite par le CREDOC³⁷ en juin 2008, qui avait pour objectif d'étudier les profils et le pourcentage des utilisateurs d'Internet par rapport à l'ensemble de la population française (figure 37), trois observations importantes peuvent être faites :

- le niveau d'étude et le diplôme sont de moins en moins des éléments conditionnant l'accès à Internet ;
- le revenu mensuel reste toujours un paramètre important ;
- le lieu de résidence reste un élément discriminant, les lieux les plus peuplés étaient les mieux connectés, on constate cependant que les lieux de moins de 2000 habitations et les plus grandes agglomérations tendent à être mieux placés que ceux qui ont entre 2000 et 100 000 hab. L'agglomération parisienne et la ville même de Paris affichent un recul de -3% en 2008 par rapport l'année précédente.

³⁷ Centre de Recherche pour l'Etude et l'Observation des Conditions de vie

		(en %)			
		Juin 2006	Juin 2007	Juin 2008	Evolution 2007 – 2008
Ensemble de la population		55	62	63	+ 1
Sexe	. Homme	61	65	66	+ 1
	. Femme	50	59	60	+ 1
Age	. 12 - 17 ans	95	93	98	+ 5
	. 18 - 24 ans	81	84	88	+ 4
	. 25 - 39 ans	74	79	82	+ 3
	. 40 - 59 ans	52	62	62	=
	. 60 - 69 ans	20	33	32	- 1
	. 70 ans et plus	(5)	(9)	12	(+ 3)
Nombre de personnes dans le logement	. Un	36	41	39	- 2
	. Deux	41	49	49	=
	. Trois	67	70	78	+ 8
	. Quatre	75	79	84	+ 5
	. Cinq et plus	73	84	83	- 1
Diplôme	. Aucun, Cep	14	21	23	+ 2
	. Bepc	46	55	56	+ 1
	. Bac	73	75	84	+ 9
	. Diplôme du supérieur	85	90	89	- 1
	. Pers âgée de 12 à 17 ans	95	93	98	+ 5
Profession	. Indépendant	44	62	66	+ 4
	. Cadre supérieur	95	96	95	- 1
	. Profession intermédiaire	89	87	88	+ 1
	. Employé	64	74	71	- 3
	. Ouvrier	52	53	57	+ 4
	. Reste au foyer	22	34	39	+ 5
	. Retraité	12	22	24	+ 2
Revenus mensuels du foyer	. Elève – étudiant	89	92	94	+ 2
	. Inférieurs à 900 €	36	42	38	- 4
	. Compris entre 900 et 1 500 €	40	43	43	=
	. Compris entre 1 500 et 2 300 €	51	60	61	+ 1
	. Compris entre 2 300 et 3 100 €	66	72	74	+ 2
Lieu de résidence	. Supérieurs à 3 100 €	80	87	89	+ 2
	. Moins de 2 000 habitants	50	55	59	+ 4
	. De 2 000 à 20 000 habitants	52	58	55	- 3
	. De 20 000 à 100 000 habitants	48	58	60	+ 2
	. Plus de 100 000 habitants	57	66	70	+ 4
	. Paris et agglo. parisienne	72	72	69	- 3

Figure 37. Profils et pourcentages des utilisateurs d'Internet en France (CREDOC, 2008)

Une étude similaire réalisée deux ans plus tard (en 2009) montre que l'intérêt de se connecter sur Internet est un élément qui touche tous les profils de la population française, sans exception, avec une progression évidente (figure 38).

Proportion d'internautes *						
- Champ : ensemble de la population -						
(en %)						
		Juin 2006	Juin 2007	Juin 2008	Juin 2009	Evolution 2008 – 2009
Ensemble de la population		55	62	63	70	+ 7
Sexe	. Homme.....	61	65	66	75	+ 9
	. Femme.....	50	59	60	65	+ 5
Age	. 12 - 17 ans	95	93	98	97	- 1
	. 18 - 24 ans	81	84	88	94	+ 6
	. 25 - 39 ans	74	79	82	89	+ 7
	. 40 - 59 ans	52	62	62	74	+ 12
	. 60 - 69 ans	20	33	32	50	+ 18
	. 70 ans et plus	(5)	(9)	12	13	+ 1
Nombre de personnes dans le logement	. Un	36	41	39	46	+ 7
	. Deux.....	41	49	49	61	+ 12
	. Trois	67	70	78	84	+ 6
	. Quatre	75	79	84	89	+ 5
	. Cinq et plus	73	84	83	85	+ 2
Diplôme	. Aucun, Cep.....	14	21	23	29	+ 6
	. Bepc	46	55	56	66	+ 10
	. Bac	73	75	84	86	+ 2
	. Diplôme du supérieur.....	85	90	89	94	+ 5
	. Pers âgée de 12 à 17 ans	95	93	98	97	- 1
Profession	. Indépendant.....	44	62	66	82	+ 16
	. Cadre supérieur.....	95	96	95	99	+ 4
	. Profession intermédiaire	89	87	88	94	+ 6
	. Employé	64	74	71	76	+ 5
	. Ouvrier	52	53	57	72	+ 15
	. Reste au foyer.....	22	34	39	47	+ 8
	. Retraité.....	12	22	24	32	+ 8
	. Elève – étudiant.....	89	92	94	96	+ 2
Revenus mensuels du foyer	. Inférieurs à 900 €.....	36	42	38	52	+ 14
	. Compris entre 900 et 1 500 €.....	40	43	43	53	+ 10
	. Compris entre 1 500 et 2 300 €.....	51	60	61	69	+ 8
	. Compris entre 2 300 et 3 100 €.....	66	72	74	77	+ 3
	. Supérieurs à 3 100 €	80	87	89	93	+ 4
Lieu de résidence	. Moins de 2 000 habitants.....	50	55	59	66	+ 7
	. De 2 000 à 20 000 habitants	52	58	55	63	+ 8
	. De 20 000 à 100 000 habitants	48	58	60	64	+ 4
	. Plus de 100 000 habitants	57	66	70	73	+ 3
	. Paris et agglo. parisienne.....	72	72	69	84	+ 15

Source : CREDOC, Enquêtes « Conditions de vie et Aspirations des Français ».

Les chiffres entre parenthèses reposent sur des effectifs faibles, ils sont à considérer avec précaution.

* Internaute, tous modes de connexion confondus : à domicile, à l'école ou sur le lieu de travail, dans les lieux publics, en Wi-Fi et à l'aide de son téléphone portable

Lecture : en juin 2009, 94% des 18-24 ans se sont connectés à Internet, soit à leur domicile, soit sur leur lieu d'études ou dans un lieu public, contre 88% en 2008.

Figure 38. Profils et pourcentages des utilisateurs d'Internet en France (CREDOC, 2009)

Une autre étude faite par le CREDOC montre la multiplication des services sur Internet. Les démarches administratives et fiscales ainsi que le commerce électronique sont les deux principales motivations pour se connecter (figure 39). Ces usages connaissent une évolution

toujours croissante durant les périodes étudiées (2001-2009) La diversité des taux traduit aussi la nouveauté des usages. Si l'action « téléphoner sur Internet *via* l'ordinateur » semble peu représenté, sa progression est toutefois très nette depuis 2005 (passant de 4 à 9%).

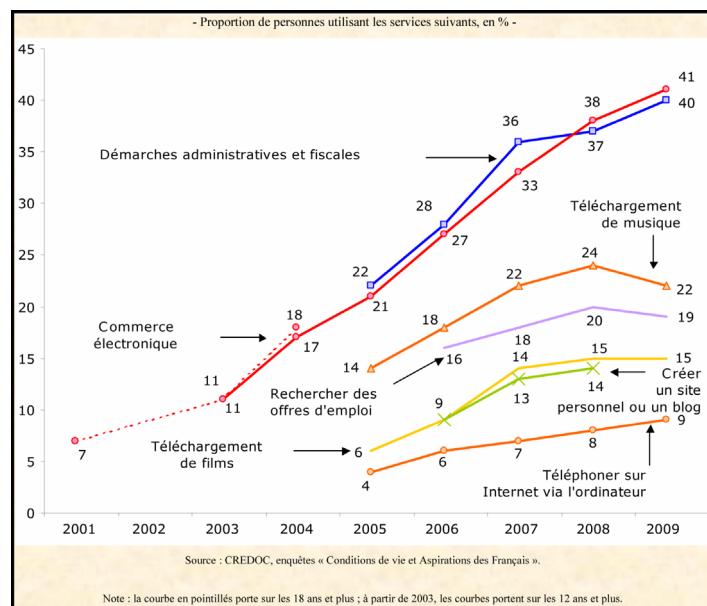


Figure 39. Multiplication des services sur Internet (CREDOC, 2009)

2.6. Le haut débit, pour quoi faire?

D'après la sixième édition de l'étude Mediascope réalisée pour l'EIAA (European Interactive Advertising Association) sur la consommation d'Internet en Europe, les Français sont les plus grands consommateurs d'Internet au quotidien. Ils sont 67 % à se connecter chaque jour au Web, contre une moyenne européenne de 55 % seulement. De plus, 29 % des internautes français seraient connectés sur Internet 16 heures par semaine, soit un peu plus que la moyenne des européens. Cette consommation d'Internet s'explique en partie par la généralisation du haut débit, qui fait de la France la championne d'Europe en la matière : 92 % des internautes français en sont équipés, alors qu'en moyenne les européens ne le sont qu'à 80 % et les internautes mondiaux à 62%.

Le déploiement d'infrastructures haut débit ou le raccordement des utilisateurs à des offres haut débit ne constituent pas une fin en soi, mais doivent s'inscrire en réponse à des besoins réels et attendus des utilisateurs. Si les besoins ne sont pas toujours exprimés à court terme par les utilisateurs, on perçoit comment les TIC et le haut débit vont profondément et rapidement transformer les pratiques en donnant accès à de nouveaux usages, par exemple :

- *Travailler ensemble et à distance*, à travers la messagerie électronique, le chat, la visioconférence ou la Webcam. Le gain de temps et l'efficacité prodigués par l'usage de ces outils les rendent progressivement indispensables notamment dans le monde professionnel, mais aussi dans la sphère personnelle.
- *Téléphoner gratuitement dans le monde entier*. La qualité de la téléphonie sur Internet n'est pas encore au niveau de la téléphonie traditionnelle. Néanmoins, la possibilité offerte pour les abonnés à l'Internet haut débit de téléphoner gratuitement dans certaines conditions constitue un attrait majeur, tant pour le monde professionnel que pour les particuliers. Grâce à des technologies sans fil (Wi-Fi, téléphonie mobile), il devient de plus en plus pratique et simple de se raccorder que ce soit à l'intérieur de locaux (le câblage des bâtiments n'est plus indispensable) que lors de ses déplacements.
- *Profiter de nouveaux moyens d'expression*. Les internautes utilisent deux fois plus Internet en mode haut débit qu'en mode bas débit. Le confort d'utilisation offert par le haut débit permet de devenir utilisateurs et consommateurs de nouveaux services, tels que la messagerie instantanée, les forums de discussion, mais aussi de devenir créateur par le développement de pages Web personnelles ou encore de carnets Web (ou Weblogs).³⁸

³⁸ Source : Les Européens et l'e – inclusion, rapport rédigé par the european opinion research group Eeig p.a. INRA (EUROPE) european coordination office s.a. Pour la DG Emploi gère et organise par La Direction Générale Presse et Communication – Opinion Publique Printemps 2001. p.10-11.

Conclusion

Les inégalités pour l'équipement en Internet ou en ordinateur par rapport au téléphone mobile restent fortes en France. Le mouvement de baisse régulièrement observé depuis 1995 s'est arrêté en 2008 pour l'ordinateur et le téléphone mobile. En ce qui concerne l'accès à Internet, les inégalités sont deux fois moins marquées en 2008 qu'au début des années 2000.

Les télécommunications renforcent les inégalités territoriales : en premier lieu, les nouveaux réseaux s'implantent de préférence dans les zones fortement peuplées, là où sont installées les entreprises ; ensuite, les techniques et les réseaux se diffusent, amenuisant la valeur ajoutée des réseaux de première génération. Par la même occasion, de nouveaux besoins en matière de télécommunication paraissent, avec des applications qui se différencient dans les zones les plus denses et les plus développées. L'accès à Internet dans les zones urbaines progresse plus rapidement car les investissements sont rentables, alors que les zones rurales ou zones dites « blanches » souffrent de l'effet du « dernier kilomètre ».

En 2009, France Télécom indique que 60% des communes drômoises ont un taux de 95% d'éligibilité au haut débit (soit 222 communes). En revanche, 15,2 % des communes (56 communes) ont un taux d'éligibilité inférieur à 50%.

Devant ce constat, l'objectif est de travailler sur les technologies qui pourraient réduire cette fracture numérique. Les réseaux sans fil semblent être les plus avantageux puisqu'ils permettent de : 1) désengorger les réseaux d'accès et les connections des utilisateurs, souvent sous dimensionnés et donc, à l'origine de la lenteur ou des ruptures de service ; 2) désenclaver les zones isolées à faible ou à moyenne densité de population, espaces considérés comme peu rentables pour les opérateurs de réseaux filaires ; 3) desservir des zones au relief accidenté et difficiles d'accès à cause du coût exorbitant et de la pénibilité particulière des travaux de génie civil ; 4) s'affranchir des coûts d'installation d'un réseau filaire. Economiquement, ces réseaux sans fil sont bien plus avantageux que les autres technologies.

CHAPITRE 3

Choix d'une commune d'étude et analyse des technologies de desserte correspondantes

Introduction

« *La réforme de France Télécom pose la question des relations entre télécommunications et territoire à travers le thème des règlements et des coûts* » (Savy, 1998). Dans ce contexte, ce chapitre présente une stratégie de desserte du territoire par Internet avec la technologie correspondante. La stratégie est élaborée en fonction du type de commune à desservir.

Le choix de la commune étudiée aux échelles locales, au sein même du département de la Drôme précédemment étudié, se justifie par une étude démographique entre les dates de recensements d'INSEE de 1982, 1990 et 1999. L'objectif de cette étude est de sélectionner une commune en croissance démographique pour ces périodes car cela suppose une demande forte et un marché de clients intéressant. Il faut également tenir compte du fait que l'accès à Internet progresse plus rapidement (très haut débit) dans les zones urbaines parce qu'il s'agit de territoires densément peuplés et où les investissements sont rentables. Les problèmes dans le choix de la technologie correspondant sont souvent liés à un problème topologique, indépendant du relief. L'existence d'une zone montagneuse empêche les travaux de génie civil pour installer le réseau filaire. La difficulté d'installation du réseau, à cause du problème topographique et du prix élevé correspondant, fait de cet espace une zone blanche.

Dans ce chapitre la technologie non filaire du Wi-Fi est la solution proposée. Le choix de cette technologie conduit à exposer le type et les paramètres d'antenne du point d'accès de cette technologie, les différentes normes possibles et les antennes intermédiaires. Les choix matériels et leur fonctionnement font également l'objet d'une présentation.

3.1. *Choix de la commune de desserte*

3.1.1. Étude démographique du département de la Drôme

En matière d'aménagement numérique, une zone blanche est un secteur géographique qui n'est pas desservi par un réseau de communication électronique, plus particulièrement par un réseau de téléphonie mobile ou par Internet. Il s'agit souvent des zones les moins densément peuplées (typiquement les zones rurales), pour lesquels les opérateurs n'ont pas intérêt à investir dans les équipements nécessaires, car ils ne peuvent pas espérer une exploitation rentable. C'est la dimension territoriale de la fracture numérique³⁹. Le contexte concurrentiel du secteur géographique est également un facteur déterminant. Dans les zones urbaines où la concurrence est la plus active, les prix et les services sont généralement plus avantageux pour le consommateur que dans les zones grises où la concurrence n'opère pas. A partir de cette idée, une étude démographique sur les communes rurales semblait nécessaire. Cette étude sert à déterminer les communes les plus attractives pour un investissement par un opérateur numérique. Un indicateur, le rapport R, qui exprime la part de la variation de la population due aux mouvements migratoires, a été utilisé puisqu'il présente l'avantage de supprimer l'effet de taille des communes. Ce rapport se calcule en divisant le solde migratoire par la variation de population.

Les résultats obtenus avec le rapport R montrent plusieurs cas de figure :

1. Si la variation de population et le solde migratoire sont de signes contraires, alors **R** est négatif. Dans ce cas, les mouvements migratoires n'expliquent pas les variations de la population. On peut distinguer deux possibilités :

- le solde migratoire est positif tandis que la variation de population est négative ; le rapport R (qui, pour rappel, est négatif) est entièrement expliqué par les excédents des décès sur la naissance ;
- le solde migratoire est négatif tandis que la variation de population est, elle, positive ; le rapport R est cette fois-ci dépendant de l'excédent des naissances sur les décès.

³⁹« Quel projet présidentiel pour Internet ? », *Le Forum des droits sur l'Internet*, 19 avril 2007

2. Si la variation de population et le solde migratoire sont de **même signe**, alors **R** est positif. Dans ce cas, les mouvements migratoires jouent un rôle dans les variations de la population. Par contre, on distingue ici deux cas :

- le solde migratoire et la variation de population sont positifs, alors les gains démographiques de la commune s'expliquent (en partie ou en totalité) par les mouvements migratoires (selon la valeur de **R**) ;
- le solde migratoire et la variation de population sont négatifs, alors les pertes démographiques s'expliquent (en partie ou en totalité) par les mouvements migratoires (selon la valeur de **R**).

Lorsque **R** est supérieur ou égal à 1, la totalité de la variation démographique d'une commune est expliquée par le mouvement migratoire. Au cas du **R** est égale à 0,5, les mouvements migratoires expliquent, la moitié de la variation de population, le mouvement naturel jouant aussi un rôle important. Autrement dit, plus **R** est proche de 0, moins le rôle des mouvements migratoires est important pour expliquer la variation démographique.

L'application de cette méthode sur les communes rurales de la Drôme donne une vision précise sur la situation démographique des communes attractives et des autres, qui sont alors répulsives. Ce rapport permet également d'expliquer les raisons de cette variation de population entre les périodes étudiées : 1982-1990 et 1990-1999 (figure 40).

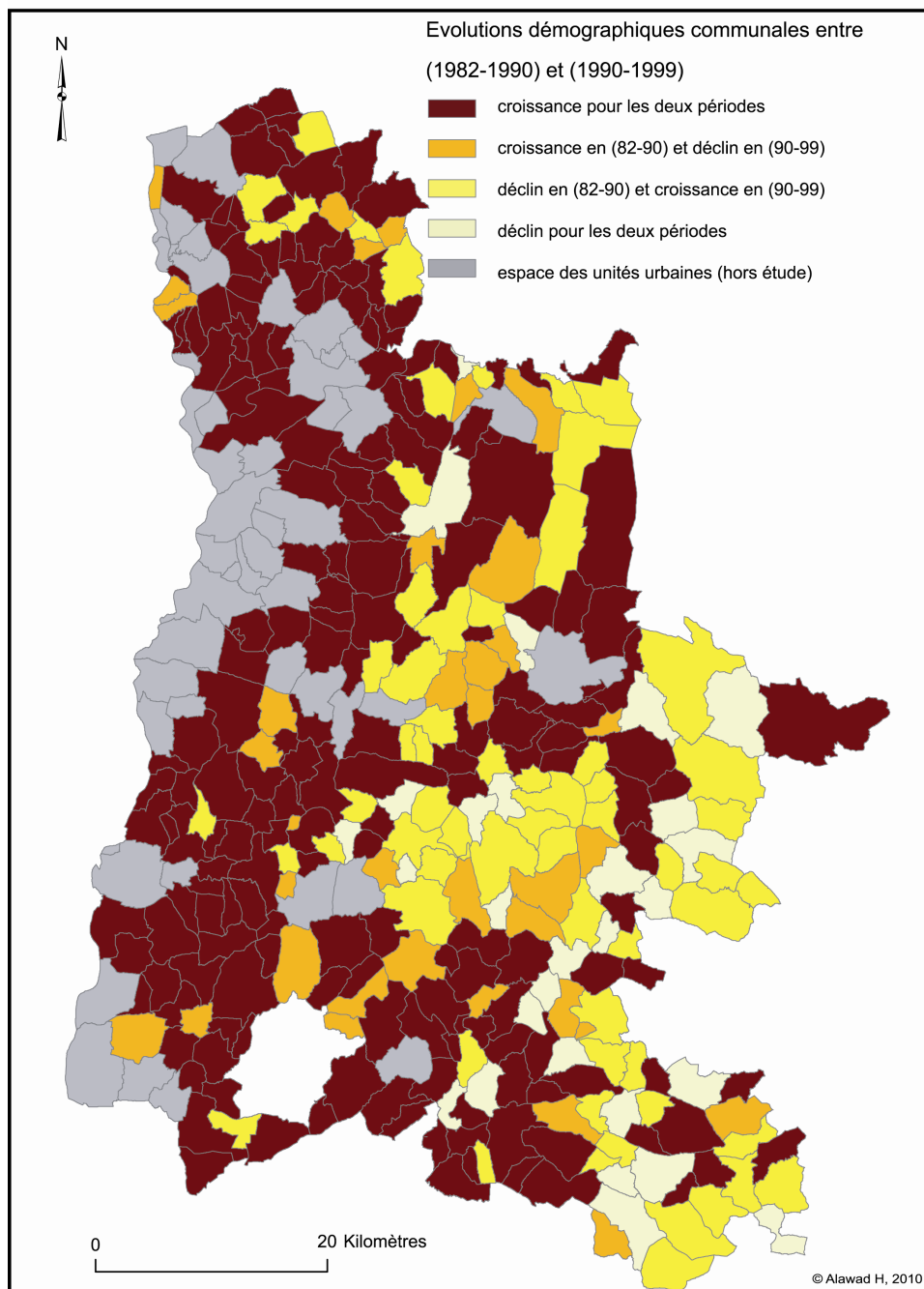


Figure 40. Mouvements démographiques du département de la Drôme au niveau communal

La carte suivante montre les communes attractives pendant les deux périodes de recensement, soit grâce à la migration positive (M+), ou grâce aux excédents de naissance sur les décès (N+) (figure 41).

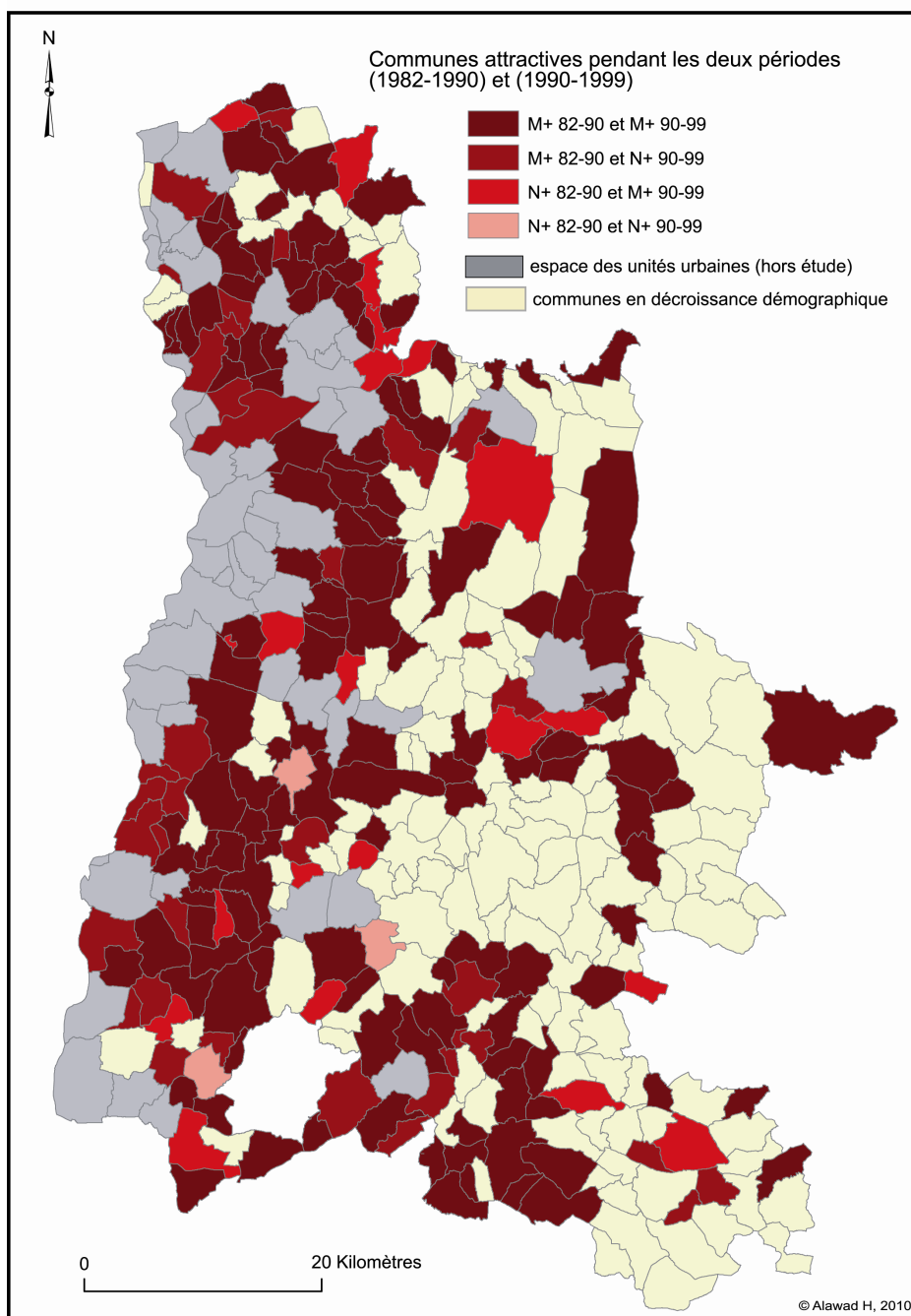


Figure 41. Les communes drômoises à évolution démographique positive entre 1982 et 1990 et entre 1990 et 1999

3.1.2. Caractéristiques démographique et choix d'une commune : La Roche-sur-le-Buis

Entre 1968 et 1999, la population de La Roche-sur-le-Buis est passée de 134 à 287 habitants soit un gain de 153 habitants en 28 ans. La population est donc en phase de croissance continue depuis 1968. Cette croissance n'a pas suivi un rythme régulier. Les données de l'INSEE soulignent la progression particulièrement importante de la population communale entre 1975 et 1982 (+4,7%) par an, et entre 1990 et 1999 (+5,1%) par an, alors que les autres périodes montrent des évolutions de moindre importance.⁴⁰

Selon le calcul de R, ce gain démographique s'explique par un mouvement migratoire toujours positif pendant les deux périodes étudiées. Entre 1982-1990, le R égal à 1, ce résultat indique que le gain démographique est expliqué uniquement par un mouvement migratoire positif. En (1990-1999), la valeur de R est 0,78, alors la plus grande part de l'évolution démographique s'explique par le mouvement migratoire positif, avec un rôle important pour le mouvement naturel.

L'accroissement de la couverture géographique relève de la stratégie des différents types d'investisseurs, la plupart opérateurs privés de télécommunications ou fournisseurs d'accès à Internet (les FAI), intéressés par les zones immédiatement rentables comme les agglomérations. Cependant, l'effet de club, selon lequel l'intérêt du réseau croît avec le nombre d'abonnés, joue à plein dans le cas d'Internet et favorise la généralisation de subventions croisées, principe de compensation entre une activité peu rentable et une activité rémunératrice, qui permet dans de nombreux cas de corriger certains déséquilibres territoriaux (Dupuy, 2002). Dans ce contexte, le but de ce travail est de couvrir tout l'espace rural non encore desservi par le HD. Les communes ayant une croissance démographique, mais, non desservies par le HD, apparaissent intéressantes à considérer pour les opérateurs (figure 42).

À partir de cette idée, on a décidé de retenir, pour approfondissement, le cas de la commune rurale qui a connu la plus forte croissance démographique tout en état mal desservie numériquement : La Roche-sur-le-Buis. L'analyse démographique est essentiellement fondée sur les résultats du recensement de l'INSEE (figure 43) : en 1968, la commune comptait 134 habitants ; elle est passée à 287 habitants en 1999 (et même à 314 habitants pour 2007 ; ces chiffres sont néanmoins postérieurs à l'étude qui avait été menée ici au début de la thèse).

⁴⁰ Selon le dernier recensement d'INSEE en 2006, la population de La Roche-sur-le-Buis est de 333 habitants avec une variation relative annuelle de 1,52% pendant la période (1999-2006).

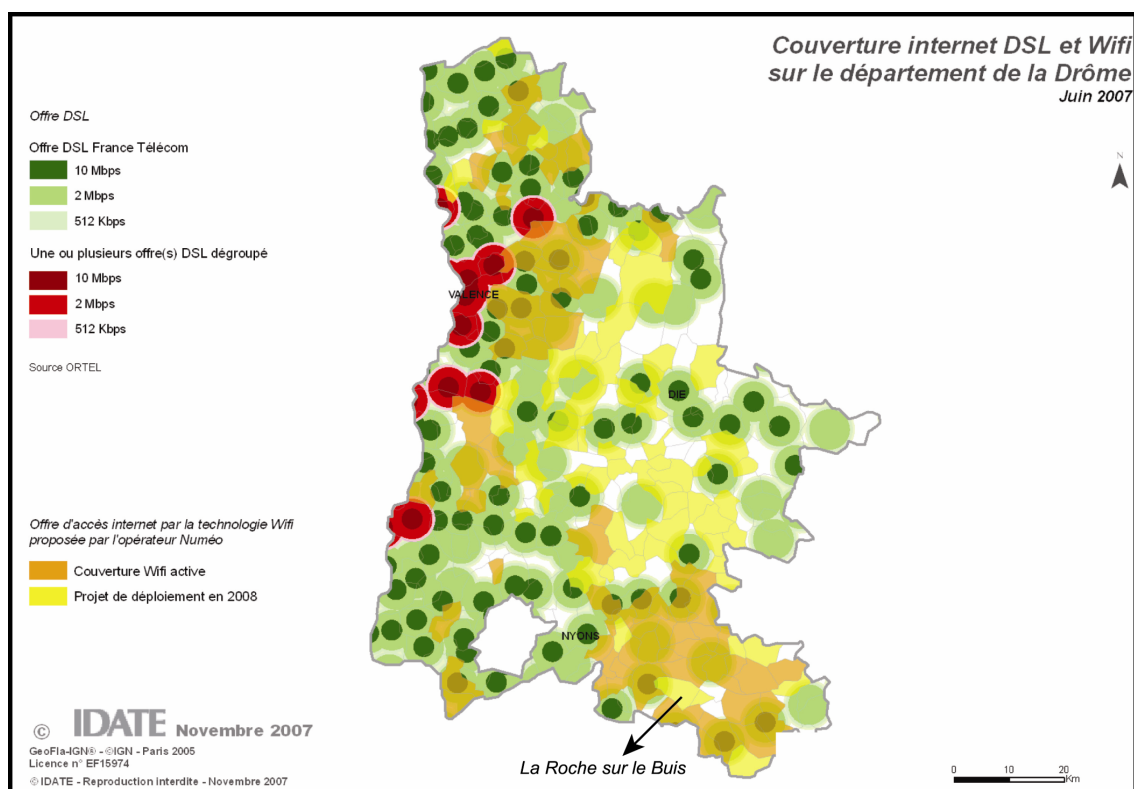


Figure 42. Couvertures DSL et Wi-Fi pour le département de la Drôme (IDATE, 2007)

Années	Population sans double compte	Variation absolue de la population	Taux de variation annuelle en %
1968	134		
1968-1975		+13	1,3
1975	147		
1975-1982		+49	4,7
1982	196		
1982-1990		+15	1
1990	211		
1990-1999		+76	5,1
1999	287		

Figure 43. Evolutions démographiques de 1968 à 1999 (INSEE, 2006)

Ce village, situé à moins de 5 km à l'ouest de Buis-les-Baronnies, est devenu depuis quelques années une zone résidentielle privilégiée. A 1 h d'Avignon, 30 minutes de Vaison-la-Romaine, en pleine campagne, La Roche-sur-le-Buis offre le plaisir d'un site remarquable au calme absolu avec, à quelques kilomètres, l'animation des villages, des marchés provençaux et des nombreuses manifestations culturelles (festival de Vaison, choralies, chorégies d'Orange, festival de jazz à Buis-les-Baronnies, etc). Les altitudes sont comprises entre 512 et 934 m, avec une bonne partie du territoire qui est localisé au-dessus de 700 m.

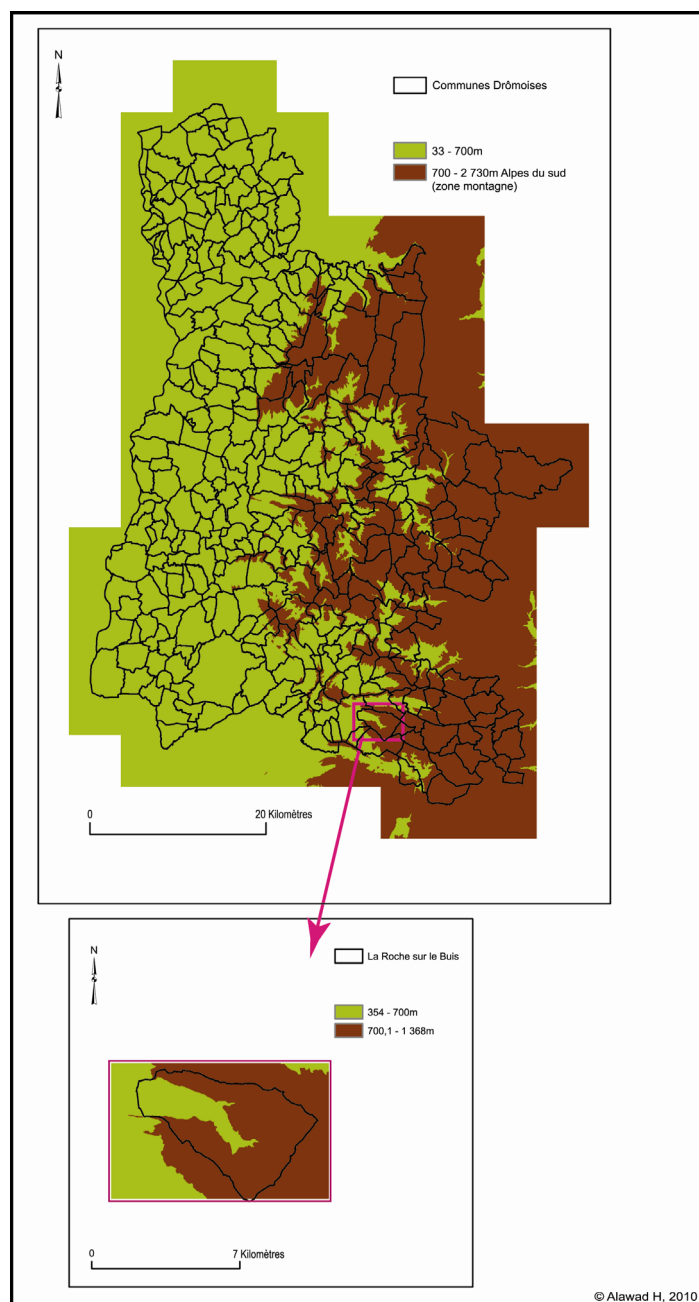


Figure 44. Topographie du département de la Drôme et situation de la commune de La Roche-sur-le-Buis

3.2. *Le Wi-Fi comme choix de la technologie de desserte*

En signant, en juin 2004, la Charte « Département Innovant » avec France Télécom, le Conseil Général de la Drôme a marqué sa volonté d'accélérer le développement de l'accès à l'Internet à haut débit et des TIC sur l'ensemble de son territoire (figure 45). Il s'agit d'un enjeu vital : 1) pour son développement économique et social : 2) pour démocratiser l'accès et l'usage de ces nouvelles technologies de l'information et de la communication.

Malgré une forte accélération du déploiement du haut débit suite à cet accord, près de 140 communes demeuraient non couvertes ou mal couvertes, et ceci pour des raisons techniques liées à la technologie filaire dite « ADSL ». En effet, la desserte en ADSL d'une ligne téléphonique dépend essentiellement de l'éloignement de chaque abonné du central téléphonique de rattachement (NRA) (figure 46).

Haut débit pour tous dans la Drôme - WiFi, fibre optique	
Objectifs	Malgré une forte accélération du déploiement du haut débit suite à la signature, en juin 2004, de la Charte "Département Innovant" avec France Télécom, près de 140 communes du département demeuraient non couvertes ou mal couvertes en ADSL. Pour couvrir ces communes, majoritairement situées en territoires ruraux, le Conseil Général a décidé de lancer un programme complémentaire en faisant appel aux technologies alternatives, notamment le WiFi. A terme, toutes les communes drômoises auront un service d'accès à l'Internet à haut débit, avec des taux de couverture variables cependant. Ceux-ci pourront progressivement être améliorés en fonction des opportunités technico-économiques. Quant au très haut débit, une étude de faisabilité a été menée par le Conseil Régional, le Conseil Général de la Drôme et de l'Ardèche en vue de créer un réseau à très haut débit à l'échelle des deux départements. En parallèle, le Conseil Général soutient la création de réseaux métropolitains très haut débit en fibre optique.
Couverture territoriale visée	L'ensemble des communes drômoises. Le Département subventionne la création des premiers réseaux métropolitains de fibre optique à Valence, Romans et dans la zone d'activités de Rovaltain.
Maîtrise d'ouvrage (collectivités)	Conseil Général de la Drôme
Maîtrise d'oeuvre	nc
Budget	nc
Date de lancement du projet	nc
Date prévue de fin des travaux	nc
Financement	nc
Modèle économique	nc
URL	www.ladrome.fr

Source : Conseil général

Figure 45. Collectivités et Internet à haut débit : situation de la Drôme (Journal du Net, 15/11/2006)

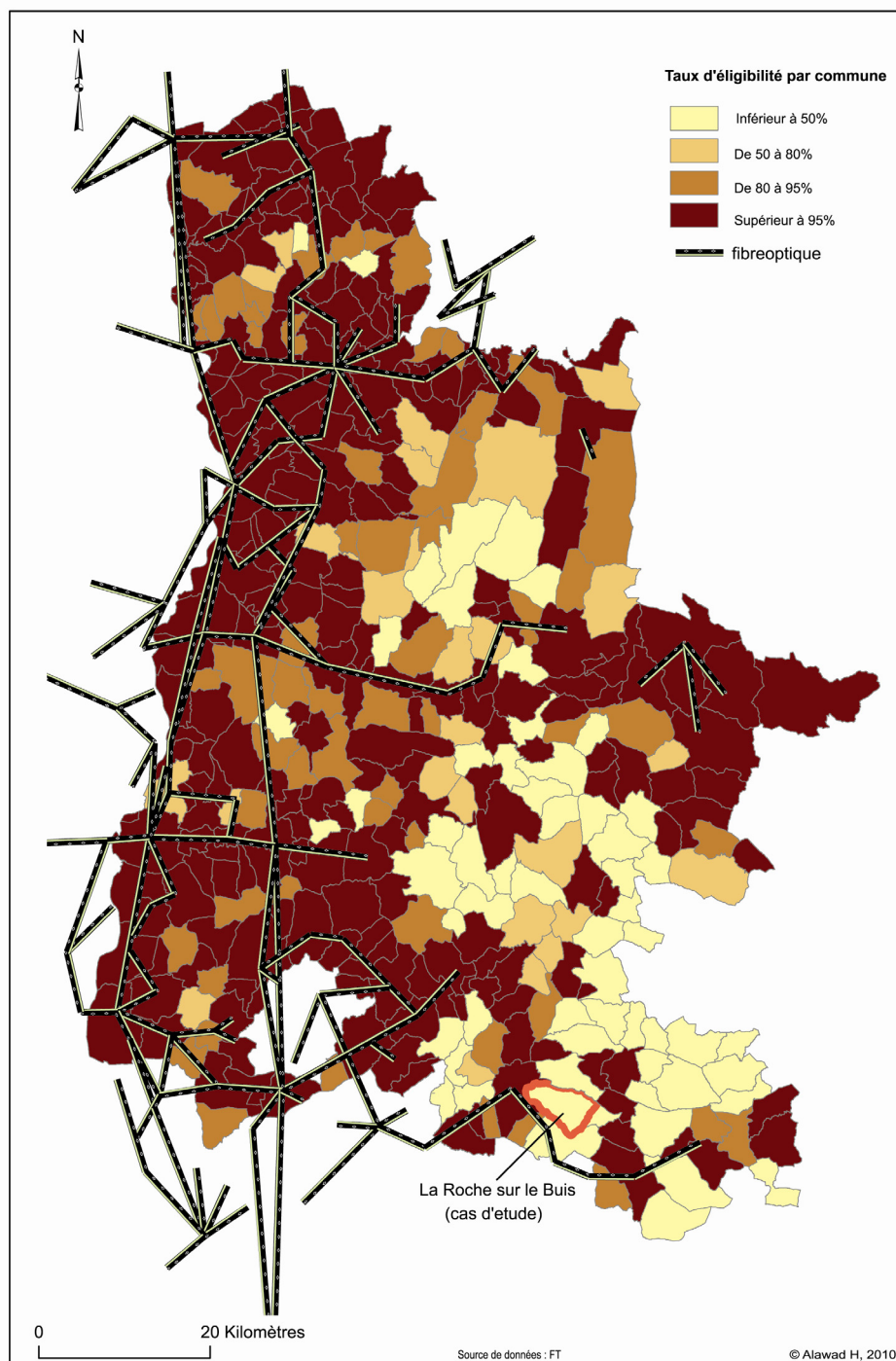


Figure 46. Taux d'éligibilité par commune

Au-delà de 5km, l'ADSL n'est en général plus disponible. Ces lignes longues de plus 5 km ne supportent pas, en général, un débit de 512 kb/s : il s'agit des zones blanche du DSL (Figure 47).

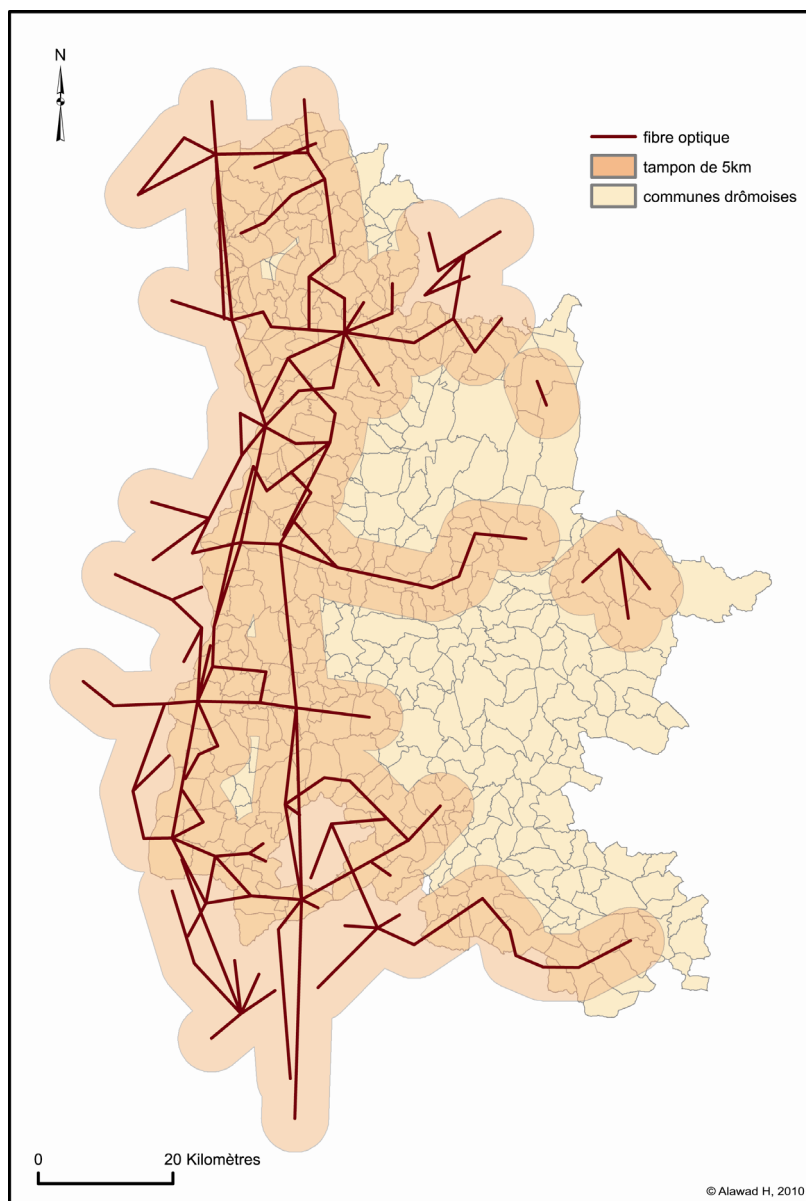


Figure 47. Territoire de desserte DSL à partir du réseau fibre optique⁴¹

Dans le contexte idéologique de la fracture numérique, l'accès à l'Internet haut débit est perçu par les acteurs comme indispensable pour le développement économique et social des territoires. Or aujourd'hui bien des zones restent blanches car les opérateurs n'envisagent pas de couvrir les territoires jugés non rentables (les communes rurales et les quartiers éloignés des répartiteurs téléphoniques). Depuis la loi pour la confiance dans l'économie numérique (2004), les collectivités territoriales peuvent déployer des infrastructures passives 2, mais aussi actives et les mettre à la disposition d'opérateurs afin de

⁴¹ La cartographie de la fibre optique est considérée comme des données confidentielles chez les opérateurs téléphoniques. A l'aide d'une méthode d'extraction des données à partir des images numériques qui sera présentée dans la deuxième partie de la thèse, cette base de données a été réalisée à partir d'une image du réseau fibre optique diffusée par France Telecom.

dynamiser le jeu concurrentiel. Leurs premières interventions se font au moyen d’expérimentations locales qui se multiplient. Ainsi, les technologies satellite et Wi-Fi ont été les premières utilisées et testées pour apporter le haut débit aux zones blanches (Fautrero, 2007).

Pour couvrir ces communes, majoritairement situées en zone rurale, le Conseil Général a décidé de lancer un programme complémentaire en faisant appel aux technologies alternatives, et en particulier au « Wi-Fi ». Des réunions publiques d’information ont été organisées par canton afin de recenser les demandes. Les solutions sont ensuite installées au cas par cas et sous réserve d’une étude de faisabilité technico-économique. La coordination des déploiements est effectuée dans le cadre d’un partenariat avec le syndicat Énergie SDED. A terme, toutes les communes drômoises auront un service d’accès à l’Internet à haut débit, avec des taux de couverture variables au cours du temps. Ceux-ci pourront progressivement être améliorés en fonction des opportunités technico-économiques. Fin 2005, deux communes sur trois de la Drôme, regroupant 90% de la population du département, pouvaient accéder au haut débit. Pour couvrir 100% des collectivités, le Conseil Général s’appuie sur la technologie Wi-Fi (sans fil) pour relier les zones qui ne bénéficient pas encore de l’ADSL (figure 42). En un an, 70 communes (dont 40 en zone blanche) ont déjà pu obtenir le haut débit de cette manière, et de nouvelles installations d’antennes Wi-Fi sont programmées par France Telecom pour étendre l’ADSL à 90 communes supplémentaires.⁴² A la suite de ces démarches, ce travail envisage une méthode explicative de desserte par le HD du reste des communes non desservies. La fracture numérique est représentée par les territoires mal desservis et l’absence de connexion numérique pénalise le développement local.

Une étude portant sur l’importance de développer le réseau Wi-Fi, publiée sur le site d’ARIASE en 2010⁴³, montre que l’utilisation du réseau Wi-Fi devait induire une progression remarquable des mobinautes. « Avec l’explosion des smartphones et l’arrivée des tablettes tactiles, la menace de saturation des réseaux 3G n’a jamais été aussi forte, d’où l’intérêt pour les opérateurs de miser aussi sur le Wi-Fi » (ARIASE, 2010). Cette tendance d’utilisation des points d’accès Wi-Fi joue un rôle important : « Le Wi-fi est un avantage concurrentiel redoutable pour les opérateurs qui désirent réduire le risque de saturation de leurs réseaux 3G, tout en réduisant les coûts d’exploitation de leurs infrastructures » (ARIASE, 2010).

⁴² <http://www.journaldunet.com/dossiers/hdregions/hddrome.shtml>, (Dernière mise à jour : décembre 2007).

⁴³ <http://www.ariase.com/fr/news/Wi-Fi-complementaire-3g-internet-mobile-article-2366.html>

3.2.1. L'architecture de la desserte sans fil

Le réseau maillé (*mesh network*) est un dispositif dans lequel les différents points d'accès communiquent entre eux, sans infrastructure parallèle. Seuls quelques points d'accès sont reliés directement au réseau régional. Cette architecture a plusieurs avantages :

- elle réduit le nombre de liens de collecte nécessaire, et donc le coût de construction et d'exploitation du réseau ;
- elle consolide et optimise le réseau : il existe plusieurs chemins pour relier deux points (possibilité de plusieurs redirections du trafic en cas de panne d'un élément ; possibilité de répartition de charge) ;
- elle facilite l'extension du réseau : il suffit d'ajouter des points d'accès en bordure de la zone déjà couverte.

A l'heure actuelle, les réseaux maillés sont généralement basés sur le Wi-Fi. Dans tous les cas, le déploiement d'un réseau de desserte sans fil s'appuie sur des point hauts (pylônes, bâtiments de grande hauteur...), sur lesquels les antennes sont placées afin d'augmenter la portée du signal et de limiter les zones d'ombre dans lesquelles le signal ne peut pas être reçu (figure 48).

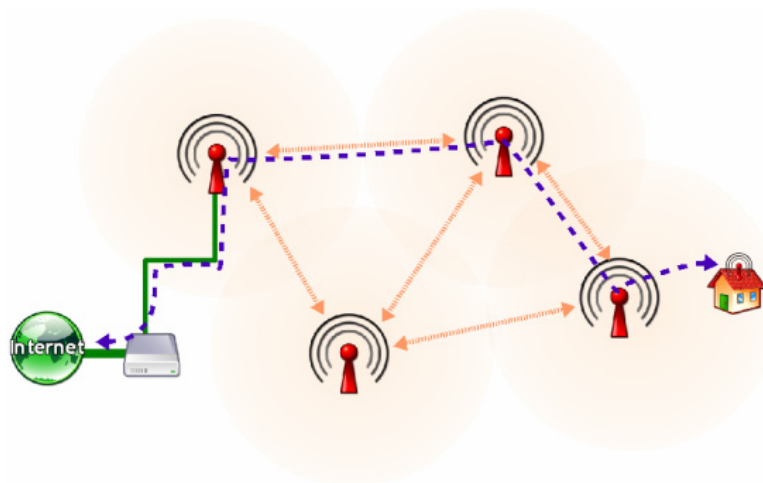


Figure 48. Desserte maillée Wi-Fi⁴⁴ (ANT⁴⁵, 2007)

⁴⁴ http://www.ant.developpement-durable.gouv.fr/article.php3?id_article=15

⁴⁵ Aménagement Numérique de Territoire

3.3. *Le choix du point d'accès (AP)*

3.3.1. Le Wi-Fi à la norme 802.11

La norme 802.11 du Wi-Fi est actuellement l'un des standards les plus utilisés au monde. Elle a été adoptée par l'IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers* – l'organisme de certification des normes de réseaux) en 1999 et est défendue par l'Alliance pour la Compatibilité de l'Ethernet sans fil (*Wireless Ethernet Compatibility Alliance*). Cet organisme est chargé de maintenir l'interopérabilité entre les matériels répondant à la norme 802.11 b. Cette norme (802.11b) est la norme la plus répandue actuellement. Elle propose un débit théorique de 11 Mbps (6 Mbps réels) avec une portée pouvant aller jusqu'à 200 mètres dans un environnement dégagé. La plage de fréquence utilisée est la bande des 2.4 GHz, avec 3 canaux radio disponibles. Elle peut être étendue si des relais sont ajoutés.

Il existe aussi la norme 802.11g qui offre un haut débit (54 Mbps théoriques, 30 Mbps réels) sur la bande de fréquence des 2,4 GHz. Cette norme est récente et son avantage est la compatibilité ascendante avec la norme 802.11b, ce qui signifie que des matériels conformes à la norme 802.11g peuvent fonctionner en 802.11b.⁴⁶

Par contre, le standard IEEE 802.11g ne peut garantir qu'un mode de transmission à la fois. S'il y a un groupe de personnes connectées en 54 Mbit/s et qu'une autre personne se joint au groupe avec une connexion Wi-Fi à 11 Mbit/s, le point d'accès change automatiquement le taux de transfert de TOUT le groupe à 11Mbit/s, tant et aussi longtemps que la personne dotée d'une carte IEEE 801.11b reste connectée.⁴⁷

La figure suivante montre les différents types d'antennes existants pour diffuser un réseau Wi-Fi avec une préférence pour le type omnidirectionnel dans les deux formes de desserte (à l'intérieur et à l'extérieur) (figure 49).

⁴⁶ <http://cerig.efpg.inpg.fr/note/2003/Wi-Fi.htm>

⁴⁷ Raphael Jauvin, *Déploiement Hotspots Wi-Fi*. Rapport technique. Paris Open Network, 4 juin 2003, p. 3-5.

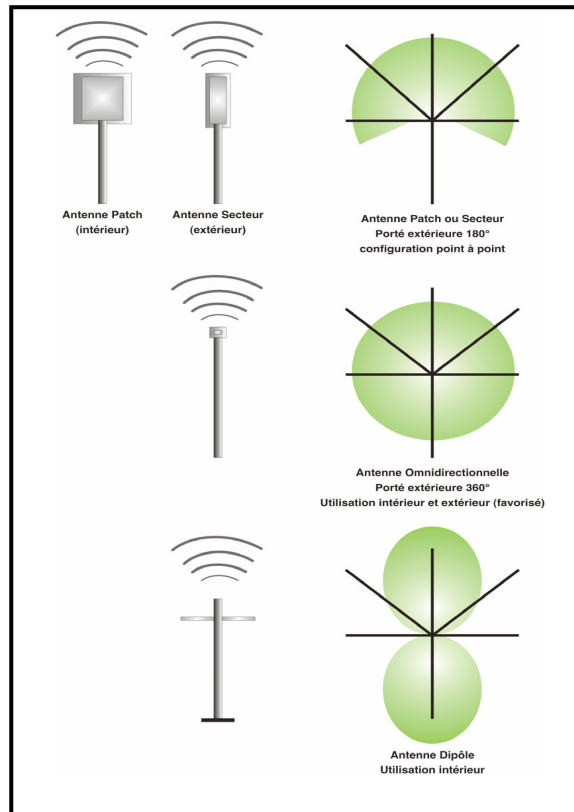


Figure 49. Exemples de types d'antennes Wi-Fi

3.3.2. Un nombre de points d'accès (AP) limité

En France, l'ARCEP n'autorise que l'accès à la bande ISM de 2,4465 à 2,4835 GHz, soit exactement les canaux 10 à 14. Compte tenu de cette limite des canaux et afin d'éviter des interférences inter-canaux pour des raisons de proximité sur la bande ISM, il est suggéré de n'affecter qu'un SEUL point d'accès AP extérieur tous les 500 mètres.

3.3.3. Le partage du débit

À proximité du point d'accès, où le signal est le plus puissant, les obstacles sont tant bien que mal contournés par les effets de diffraction et de réflexion des ondes. Plus on s'éloigne du point d'accès, plus on devient tributaire du moindre obstacle. Le standard IEEE 802.11 utilise le mécanisme de variation de débit « Variable Rate Shifting ». Lorsque le signal est trop faible, du fait de la distance ou des obstacles, les appareils Wi-Fi tentent d'établir la connexion avec un débit moindre: 11 Mbps si possible, sinon 5,5 Mbps, sinon 2 Mbps, sinon 1 Mbps lorsqu'un utilisateur se trouve ou s'éloigne beaucoup du point d'accès.

Comment fonctionne un réseau Wi-Fi ? Le schéma explicatif du fonctionnement de ce réseau est rappelé sur la figure suivante (figure 50). Deux paramètres sont importants à prendre en compte pour desservir un usager par le réseau Wi-Fi : 1) l'intéressé doit se situer dans un rayon de 500 m à partir de ce point d'accès ; 2) l'intéressé doit être visible.

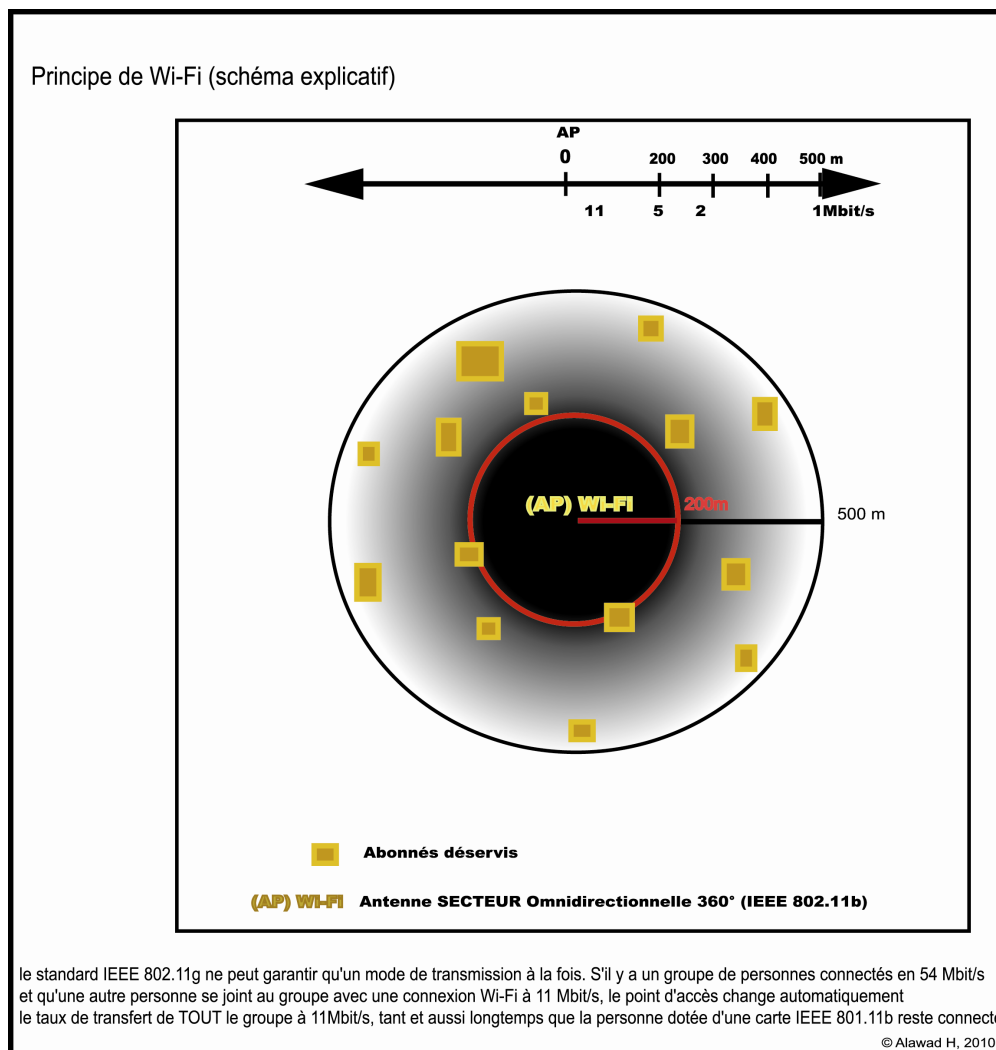


Figure 50. Fonction d'antenne Wi-Fi et débits correspondants, avec dégradation de puissance dans la zone de desserte

Dans certains cas, il est nécessaire d'utiliser des relais intermédiaires pour atteindre des utilisateurs plus éloignés. « Ces relais pourraient être implantés en utilisant les maisons ou infrastructures d'utilisateurs bien situés. Les relais sont des appareils Wi-Fi similaires à l'émetteur-récepteur du point d'accès, avec des fonctions répéteur ou pont » (Jauvin, 2003)⁴⁸.

⁴⁸ Raphael JAUVIN, *Déploiement Hotspots Wi-Fi*, rapport technique, Paris Open Network, 4 juin 2003, p9.

Pour un point d’accès AP Wi-Fi à 11Mbit/s, il est fortement conseillé, afin de garantir un minimum de taux de transfert individuel, de limiter à **30** voir **20** connexions simultanées. Afin d’améliorer le débit et de permettre à plus d’utilisateurs de se connecter, il est plus souhaitable d’ajouter des points d’accès AP (répéteur) sur la même dorsale Ethernet (DS) que d’augmenter l’intensité de l’antenne (limité à 100 mW par ARCEP). Dans les faits, il s'agit d'un partage de connexion, ce qui peut faire craindre que le débit obtenu au final par chacun soit diminué du fait du partage. Si on a une connexion à 256K/1024K au départ, et qu'il y a 25 clients à s'en servir, le débit de chacun est théoriquement divisé par 25. En pratique, il ne l'est jamais parce que chacun des 25 n'occupe jamais toute la bande passante en même temps. Il laisse toujours des trous, qui sont plus ou moins importants selon les applications, dans lesquels les paquets des autres usagers s'insinuent.

Par contre, les téléchargements de gros fichiers en continu (MP3, DivX, logiciels) tendent à occuper toute la bande passante dont ils peuvent disposer et occasionnent des ralentissements sensibles lorsque plusieurs usagers utilisent simultanément leur accès. Sur ce point particulier, la qualité de liaison est inférieure à celle d'une connexion ADSL, qui s'appuie sur un backbone en fibre optique et est par là même en mesure de garantir le débit maximum à un grand nombre d'usagers simultanés.

3.3.4. L’augmentation de la zone de couverture de l’AP

Un AP est un *Access Point*, c'est-à-dire un boîtier électronique capable de recevoir des paquets de bits d'un expéditeur A et de les envoyer à un destinataire B, alors qu'A n'est pas en liaison avec B. Les AP utilisent deux antennes omnidirectionnelles qui sont séparées de 10 cm en moyenne et qui fonctionnent en mode “diversité”. Une des solutions consiste à remplacer l’une des 2 antennes par une unidirectionnelle (qui n'émet que dans une seule direction). On augmente (ou on concentre) la puissance puisque l'onde n'est plus envoyée sur 360°, mais sur 180° (environ) seulement, donc 2 fois plus. Tous les appareils doivent être reliés à une alimentation électrique pour fonctionner.

3.3.5. Les similitudes techniques du point d’accès Wi-Fi et des relais intermédiaires

Ces deux types de connexion présentent des ressemblances du point de vue de leur fonctionnement :

- ils ont la même capacité de couverture (environ 500 m) ;
- la même puissance de débit (11 Mbit/s) ;
- la même capacité à desservir le même nombre d'utilisateurs (entre 25 et 30).

3.3.6. Relations techniques entre le point d'accès Wi-Fi et les relais intermédiaires

Ainsi le relais doit être visible du point d'accès et à l'intérieur du cercle couvert. Dans cet espace, il y a la possibilité d'avoir plusieurs relais, mais un seul point d'accès. Le point d'accès est installé habituellement dans un endroit public dans le cas où un fournisseur d'accès a déjà installé un réseau filaire (église, mairie, château d'eau, bibliothèque, école, moulin, etc.). Par contre, les relais peuvent être installés dans des espaces privés, par exemple chez les abonnés (un bâtiment bien situé).

Le point d'accès a besoin d'une ligne téléphonique (fibre optique) et une ligne électrique pour fonctionner. Dans le cas d'un fort éloignement du central téléphonique, le satellite peut être une solution, mais coûteuse. Par contre, le relais fonctionne juste avec une source électrique, il prend le service HD Internet du point d'accès (AP). À partir d'un relais fourni par l'AP, il y a la possibilité d'avoir d'autres relais pour assurer la continuité de desserte. Un relais prend la licence du point d'accès (AP) et il le diffuse aux autres relais intermédiaires (figure 51).

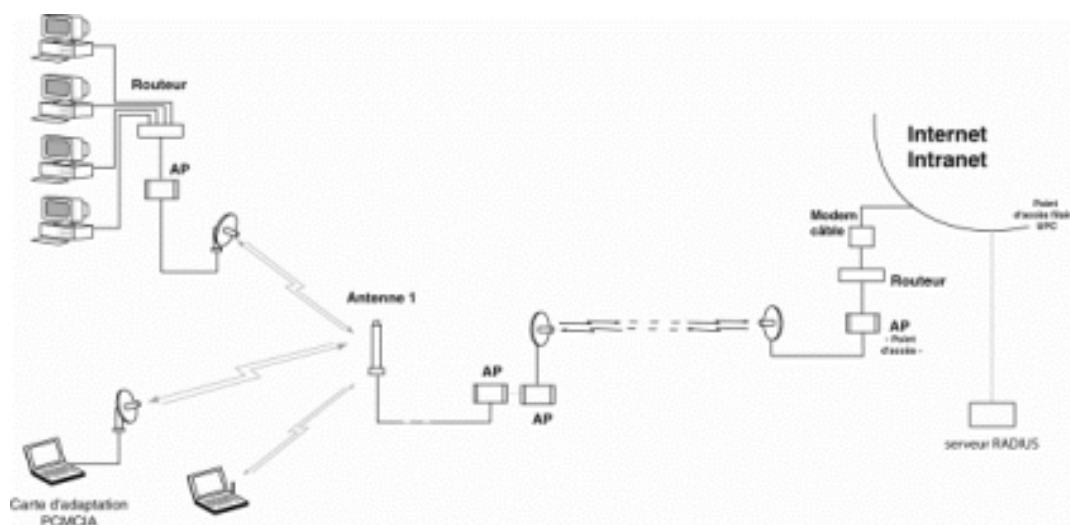


Figure 51. Diffusion du réseau Internet en mode non filaire à partir d'un mode filaire (ARIASE, 2008)

3.3.7. Les capacités de desserte des relais intermédiaires

L'aptitude à couvrir la plupart du bâti est l'objectif principal. À partir d'un point d'accès, la mairie par exemple, on calcule le champ de visibilité (les points visibles sur le terrain à partir de ce point d'accès donné). Les relais doivent être dans le champ visible (bâtiments publics ou même privés). Ensuite, si la couverture du point d'accès n'est pas suffisante pour couvrir tous les bâtiments souhaitables, la solution est de compléter la desserte par des relais intermédiaires. Généralement, le point d'accès dessert 20 abonnés au minimum et 30 au maximum (25 en moyenne). Pour desservir plus d'abonnés, la solution est d'installer un relais du réseau. Dans ce cas, si le point d'accès dessert 24 abonnés, il est capable de desservir un relais intermédiaire...

Conclusion

La situation démographique de la commune à desservir et la connaissance de la technologie de desserte associée sont des éléments qui doivent nécessairement être pris en compte pour définir la manière dont un point d'accès au réseau à haut débit doit être implanté. La typologie du terrain, la distribution des éléments bâtis, la position du point d'accès et le nombre d'abonnés sont autant d'éléments à considérer pour mettre en service un réseau Internet. La commune de La Roche-sur-le-Buis a été choisie car elle représente un intérêt économique pour les futurs opérateurs de desserte. La croissance démographique observée pendant les périodes étudiées (passant de 134 habitants en 1968 à 287 habitants en 1999) fait de cette commune un espace intéressant à investir pour les opérateurs d'accès. De son côté, le choix de la technologie Wi-Fi est adaptée à la morphologie de cet espace, ce qui répond à une demande qui fait de ce projet une perspective envisageable.

L'intérêt économique pour lancer les procédures de ce type de réseau de desserte fait le lien d'un tel projet entre la phase théorique et la phase pratique plus opérationnelle. Pour l'opérateur de réseaux, l'intérêt est d'avoir un nombre important d'abonnés intéressés par ces ondes de service qui forment un marché d'acheteur potentiel.

CHAPITRE 4

**Scénarios de desserte par la technologie Wi-Fi
et méthode d'estimation de la population à desservir**

Introduction

Ce chapitre présente une méthode de desserte par les technologies non filaires, et en particulier le Wi-Fi. Son application repose sur l'utilisation de la BD Topo de l'IGN. Ces données topographiques permettent d'utiliser des techniques d'analyse spatiale, en particulier le calcul du champ de visibilité. Le choix de cette technique permet d'analyser la portée physique des ondes diffusées par les technologies non filaires qui ont presque toutes le même principe ; elles ont pour but la desserte de zones visibles à partir d'un point d'accès (position de l'antenne Wi-Fi). La technique du champ de visibilité repose sur l'estimation des surfaces *raster* visibles à partir d'un point donné. Choisir différentes positions pour l'installation de l'antenne du point d'accès (AP) permet d'envisager plusieurs scénarios de desserte.

4.1. *Les données dans les bases IGN*

La précision est essentielle dans une base de données SIG, même si elle entraîne une élévation notable du coût des données. Aussi bien qu'il existe plusieurs fournisseurs publics et privés, le choix s'est porté sur les données de l'Institut Géographique National (IGN), et en particulier sur la BD-TOPO et la BD-ALTI qui sont d'une grande précision.

4.1.1. La BD-TOPO Pays

La BD-TOPO Pays est une base de données comprenant une description physique tridimensionnelle du territoire national. C'est la composante nécessaire à la constitution de systèmes d'informations localisées. Cette base topographique est produite par l'institut Géographique National sur le territoire français (IGN). Elle contient une description des éléments du paysage sous forme de vecteurs, classés par thématique adaptée, avec une précision métrique, exportables à des échelles allant du 1/5000e au 1/50 000e. Cette BD-TOPO fournit les valeurs altimétriques des objets, et en particulier la hauteur des bâtiments.

Elle comprend :

- *le réseau routier* regroupe les routes, les sentiers et les franchissements en précisant dans la plupart des cas la largeur des voies ;

- *le réseau ferré* est constitué des voies ferrées y compris en milieu urbain et des gares.

Ces deux premiers thèmes peuvent s'avérer localement importants si ces rues et voies ferrées sont des surfaces potentiellement réfléchissantes ;

- *l'hydrographie* fournit une description des cours d'eau (naturels ou non), des zones hydrographiques et des réservoirs d'eau. Elle n'est pas déterminante dans l'étude des liaisons de proximité même si parfois des points d'eau (lacs, étangs...) peuvent engendrer des coefficients de réflexion relativement élevés ;

- *l'occupation du sol* contient une description des surfaces végétales ou minérales (bois, vigne, glaciers, pêcheries, ...), avec leurs diverses limites (murs, haies, rangées d'arbres, clôtures, levées de terre, coulées d'éboulis, bords de crevasse, ...), et les objets naturels remarquables (arbres, rochers,...).

- *les bâtiments* regroupent les installations industrielles, agricoles, commerciales, les constructions et les sites touristiques ;

- *les équipements* regroupent les enceintes industrielles, administratives, commerciales ainsi que les lignes de transport d'énergie, les réservoirs et les équipements sportifs ;
- *l'altimétrie* associe l'ensemble des courbes de niveaux et des points cotés ;
- *l'administratif* donne des informations sur les communes, les limites administratives et les limites de domaine ;
- *la toponymie* informe sur le nom des lieux.

Les deux derniers thèmes sont intéressants car ils permettent un repérage plus rapide qu'à partir des coordonnées géographiques (longitude - latitude ou Lambert).

A partir d'un ou de plusieurs thèmes, on construit les différentes couches GIS (la couche « bâti » : bâtiments). Bien que la BD-TOPO existe en différents formats, c'est le format *Shapefile* compatible avec notre logiciel SIG qui a été choisi.

4.1.2. La BD-TOPO MNT

La BD-ALTI (ou appelée BD-TOPO MNT) est une base de données alphanumériques qui décrit à différents niveaux de précision le relief du territoire national. Cette base est produite aussi par l'IGN. Dans notre travail, on utilise un format de BD-ALTI qui s'appelle MNT (Modèle Numérique de Terrain). On le prend à la meilleure précision géométrique : 25m. Ces données sont très importantes, surtout pour des zones accidentées où les variations de niveaux au sol peuvent être fortes sur de courtes distances.

4.2. *Choix des modèles de données raster et vecteur*

Comparé au modèle de données vecteur, le modèle de données *raster* est très simple. En effet, le *raster* est une table de lignes et colonnes qui stockent des valeurs numériques. Du fait de la simplicité du modèle de données *raster*, les traitements sont beaucoup plus rapides que le modèle de données *vecteur* (Robin, 2002). De nombreuses analyses ne sont possibles qu'avec des données *raster*, par exemple calculer la visibilité du paysage à partir d'un positionnement. Certaines analyses sont plus rapides et plus simples à exécuter avec les données *raster*, comme combiner plusieurs couches géographiques ensemble : alors que la procédure est longue et compliquée pour des données vectorielles, elle est assez simple pour les données *rasters*.

4.3. *Le principe d'analyse du champ de visibilité*

L'objectif de ce travail s'appuie sur la création ou l'utilisation d'une méthode technique à régler le problème de desserte numérique dans les zones blanches du haut débit. L'utilisation de la technologie alternative est la solution souhaitable. Dans les zones peu denses, la desserte haut débit par les réseaux filaires n'est pas toujours assurée (Ballard, 2009). Dans ce cas, le Wi-Fi, le Wimax et la BLR libre sont des solutions possibles, car bien adaptées à la couverture rapide de zones où la clientèle est dispersée (ANT, 2007).⁴⁹

Ce travail présente cette solution en équipant l'espace par le Wi-Fi. Sa mise en place est facilitée par le recours à un logiciel cartographique (ArcGIS) appelée le champ de visibilité. Le Wi-Fi fonctionne en principe comme toutes les technologies non filaires (Fautrero, 2006). Un réseau sans fil est un réseau dans lequel au moins deux terminaux sont capables de communiquer entre eux grâce à des signaux radioélectriques. Les réseaux sans fil ne sont pas récents, mais avec le développement de l'informatique et des systèmes d'information, les technologies répondent à des besoins essentiels de l'homme : la mobilité et la facilité (ANT, 2007). L'idée est d'utiliser un point visible, stratégique et éligible aux réseaux haut débit et d'envoyer le signal à partir de ce point vers les abonnés visibles équipés de stations. Toutes les stations reçoivent ainsi tout le trafic du réseau !

4.4. *Les projections*

En amont des procédures de traitement, le système de coordonnées géoréférencées doit être choisi. Cette opération permet d'intégrer les données dans les SIG et de bien les caler dans l'interface du logiciel avec leurs coordonnées géographiques. Pour les représentations devant couvrir la France entière en une projection, la projection utilisée est la "*Lambert II étendu*", qui reprend tous les paramètres du *Lambert II Carto*. C'est à ce jour la projection généralement utilisée dans les SIG français. À terme, la projection Lambert93 remplacera le *Lambert II étendu*, qui ne présente plus de compatibilité et de précision suffisantes.

4.5. *Un MNT compatible pour l'analyse du champ de visibilité*

Le calcul du champ de visibilité nécessite un format *raster* du terrain étudié et un point vecteur. Les calculs de surface sont effectués à partir de ce point et requiert de recourir à un

⁴⁹ http://www.ant.equipement.gouv.fr/article.php3?id_article=15

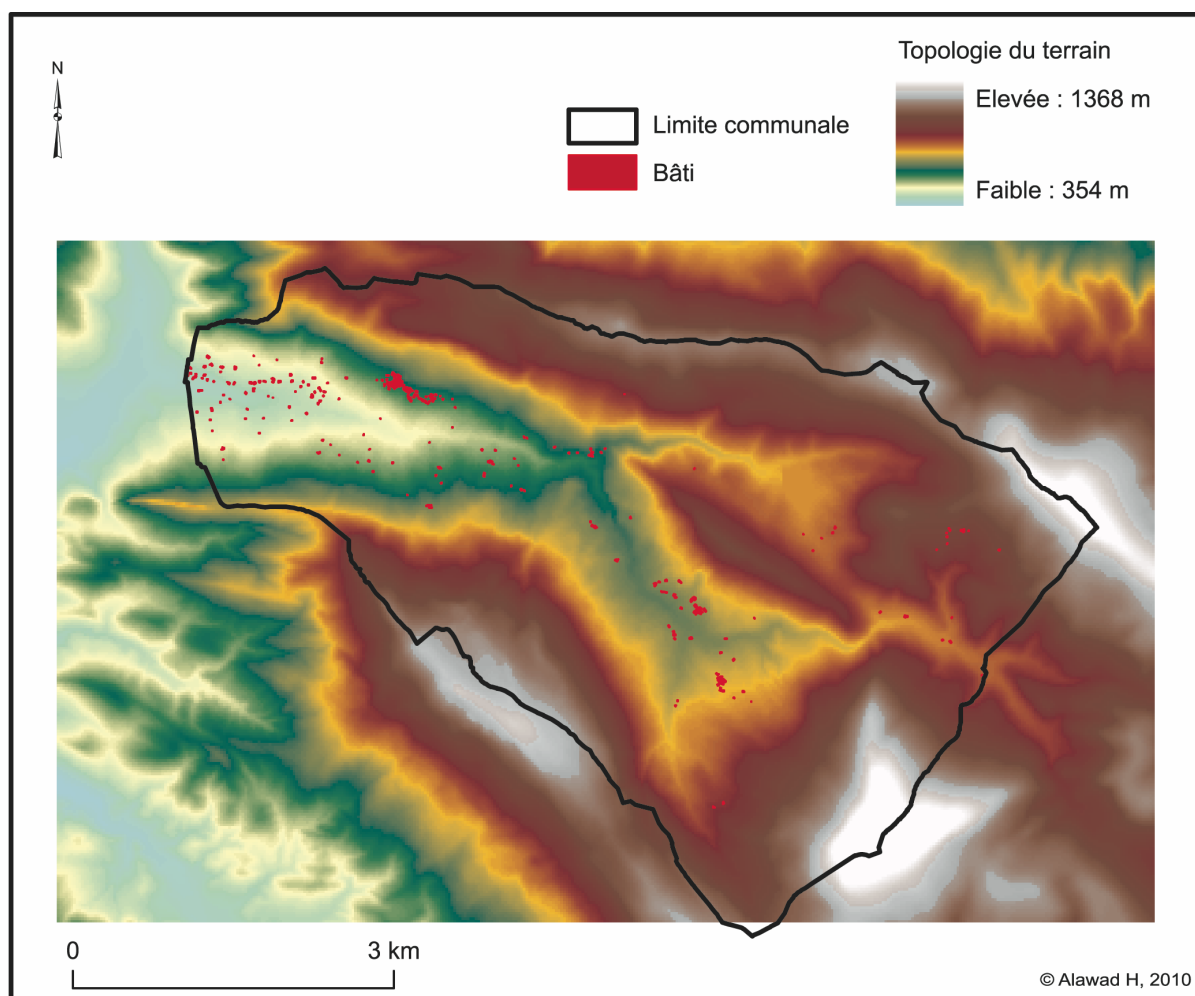
logiciel comme ArcGIS pour effectuer ces opérations techniques. Le principe est de transformer le fichier *vecteur* MNT vers *raster* et de choisir un point vecteur pour lancer le calcul et mesurer le champ de visibilité. L'application de cette analyse apparaît simple en théorie mais, dans la pratique, le rayon Wi-Fi aura, sur un espace donné, un nombre de barrières important (figure 52).

Type d'obstacle	Affaiblissement relatif du signal	Exemple
Espace libre	Nul	Cafétérias, cours extérieures
Bois	Faible	Murs, cloisons ou parois intérieurs, portes, planchers
Plâtre	Faible	Parois intérieures (affaiblissement moins important pour les plâtres anciens que pour les plus récents)
Matériaux de synthèse	Faible	Cloisons
Parpaing	Faible	Parois, murs extérieurs
Amiante	Faible	Plafonds
Verre	Faible	Vitres non teintées
Verre armé	Modéré	Portes, cloisons
Verre teinté (teneur en métal)	Faible	Fenêtres teintées
Corps humain	Modéré	Foules
Eau	Modéré	Bois humide, aquariums, stocks de matières organiques
Briques	Modérée	Parois, murs extérieurs et sols
Marbre	Modéré	Parois, murs extérieurs et sols
Céramique (contenu ou couverture métallique)	Forte	Carrelages et tuiles en céramique, plafonds, sols
Papier	Fort	Bobines ou ramettes de papier
Béton	Fort	Sols, murs et piliers porteurs
Verre pare-balles	Fort	Cabines de sécurité
Argenture	Très fort	Miroirs
Métal	Très fort	Bureaux, cloisons, béton armé, conduits d'ascenseurs, armoires de rangement ou de classement, systèmes anti-incendie (sprinklers), ventilateurs

Figure 52. Affaiblissement du signal radio selon les types d'obstacle (Intel, 2005)

Le but de la desserte Wi-Fi est de couvrir les habitats repartis sur l'espace sélectionné. Cette technologie non filaire est basée sur une liaison utilisant des ondes radio-électriques. Les bâtiments forment des hauteurs supplémentaires sur le MNT du terrain et le béton utilisé

pour la construction est un obstacle fort qui empêche la diffusion des rayons Wi-Fi⁵⁰. Ces hauteurs doivent donc être prises en compte pendant l'analyse de terrain pour le calcul du champ de visibilité. Ces bâtiments sont des structures qui vont pouvoir être utilisées comme des points privilégiés d'installations de relais intermédiaires de l'antenne (AP) (figure 53).



Pour créer un MNT guidant la création d'un réseau de desserte sans fil (Wi-Fi), il faut tout d'abord changer les polygones bâtis avec les points de leurs *centroïdes*, ce que fait l'outil « *ET GEOWizards* » dans *ArcGIS*. La solution dans un tel cas est l'option « *intersection* » qui permet de faire le regroupement des hauteurs souhaitables automatiquement.

⁵⁰ <http://www.canardWi-Fi.com/2005/07/13/affaiblissement-du-signal-radio-selon-les-obstacles/>

Le résultat est mauvais s'il existe des écarts de superposition entre les points MNT et les *centroïdes* de bâtis⁵¹. La solution est alors de créer un tampon de 12.5m⁵² autour de chaque point vecteur du MNT. Ensuite, une superposition est effectuée entre les polygones de bâti et les tampons créés. La superposition est effectuée à partir de l'option « *union* ». Cette fonction d'ArcGIS permet d'avoir un nouveau MNT regroupant les deux fichiers vecteurs précédents avec toutes les informations qu'ils contiennent. L'étape suivante consiste à sélectionner les éléments du bâti à partir de la table de données de ce résultat. Finalement, on a un seul fichier de points qui est prêt à être transformé vers un fichier *raster* via l'opération « *convertir* ». Ce nouveau *raster* forme la surface du terrain destinée au calcul du champ de visibilité.

4.6. Stratégie d'implantation d'un point d'accès (AP)

Il est ensuite nécessaire de bien choisir la position stratégique de l'antenne (AP). Le choix de cette localisation repose sur deux critères à prendre en compte :

- un point visible par une étendue d'espace maximale (les abonnés) ;
- un accès Internet filaire, par exemple, la fibre optique, qui permet de distribuer le réseau non filaire (fournisseur d'accès).

Bien localiser cette station permet de 1) faciliter l'installation des relais intermédiaires pour la fourniture d'accès pour un coût minimal et 2) réduire le nombre de relais pour une couverture optimale. Le point le plus haut du terrain d'analyse n'est pas nécessairement le point le plus stratégique, ni le point le plus visible par rapport à la surface totale à équiper. Les points bas ne sont pas toujours visibles à partir du point le plus élevé sur le terrain (figure 54).

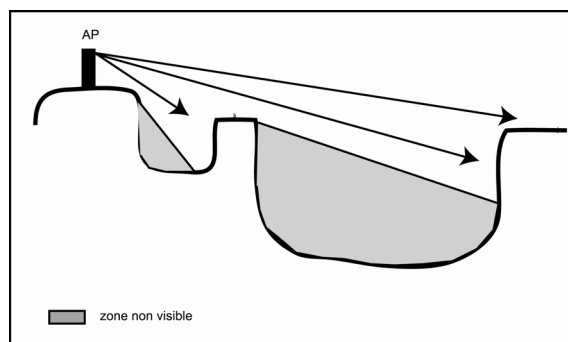


Figure 54. Points visibles à partir du point le plus haut de l'espace

⁵¹ Cette opération se fonctionne que pour des données de type *vecteur*

⁵² La distance entre deux points du MNT dans cette analyse est de 25 m. Les tampons créés sont de 12,5 m de rayon pour qu'ils ne superposent pas.

4.7. *Trois scénarios d'étude pour installer l'AP*

Trois scénarios ont été pris en compte dans notre approche pour desservir une zone blanche du département de la Drôme. Une application a été envisagée sur la commune de La Roche-sur-le Buis. La démarche générale et la stratégie d'installation sont transposables pour toutes les autres communes qui souhaiteraient utiliser des technologies non filaires comme le Wi-Fi et le Wimax. « *En dehors des zones très denses, les caractéristiques de l'habitat, la densité de la population, la disponibilité des infrastructures de génie civil et la viabilité des déploiements en parallèle des opérateurs sont très hétérogènes* » (ARCEP, 2010). La zone géographique étudiée est mal desservie par le haut débit pour différentes raisons : problèmes d'infrastructures ; éloignement de central téléphonique (NRA) ; manque d'utilisateurs.

Les trois scénarios envisagés :

- *scénario 1* : possibilité de desservir l'espace étudié à l'aide des infrastructures existantes comme l'implantation des points d'accès (AP) aux bâtiments publics hauts comme les mairies, les églises, les monuments historiques...etc. les châteaux d'eau, les relais de télécommunication ou même les maisons bien situées sur le terrain. Il faudrait ici qu'on prit en compte que ce point ou ce lieu soit connecté par HD pour pouvoir le diffuser sur toute l'espace souhaité donc le choix ici basé sur l'existence de connexion au HD.
- *scénario 2* : possibilité de desservir le terrain à partir d'un point qui assure une couverture optimale de l'espace. Dans ce cas la création d'une nouvelle infrastructure sera peut-être nécessaire. Le choix de ce point relève d'une stratégie purement spatiale.
- *scénario 3* : possibilité de combiner les deux scénarios précédents pour obtenir une couverture spatiale optimale du terrain. Elle repose sur la visibilité du point stratégique de l'espace à partir du point de connexion de la mairie et sa zone de desserte.

Bien évidemment, le deuxième et le troisième scénario sont les plus coûteux malgré qu'ils garantissent une couverture maximale pour l'espace étudié. La construction d'une nouvelle infrastructure effectivement est coûteuse. D'une côté économique, Pour que l'opérateur soit intéressé a un tel projet, le nombre des abonnés envisagé doit être important. D'ailleurs, les nombres d'antennes et des relais intermédiaires sont aussi importants. « *Il apparaît notamment qu'en zones moins denses, certains opérateurs ne pourront pas participer dans*

l'immédiat aux différents projets de co-investissement, soit du fait de leurs capacités financières plus limitées, soit en raison du temps nécessaire au déploiement de leurs réseaux. Il apparaît donc indispensable que des offres d'accès a posteriori permettent un usage pérenne de l'infrastructure afin de ne pas figer la structure de la concurrence des prochaines décennies par rapport à la capacité des opérateurs tiers à investir dès le départ de la construction de l'infrastructure » (ARCEP, 2010).

4.7.1. La mairie comme point d'accès (AP)

L'idée est d'utiliser un point d'accès Internet depuis une zone éligible et d'envoyer le signal par l'onde du Wi-Fi via un système d'antennes préalablement positionnées sur des points hauts stratégiques. La mairie apparaît être un bon choix dans ce contexte (figure 55).

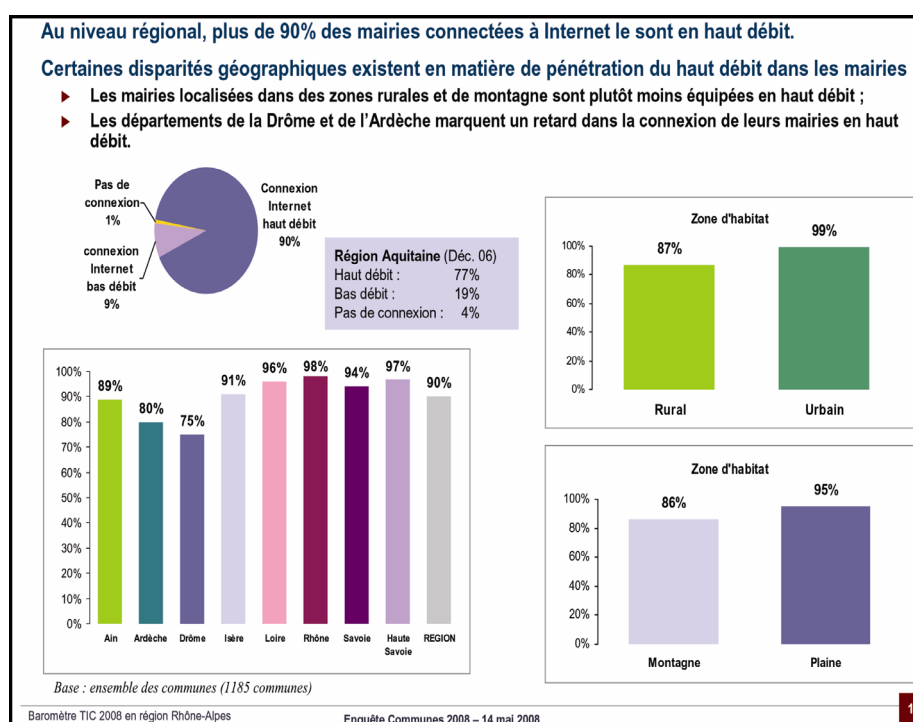
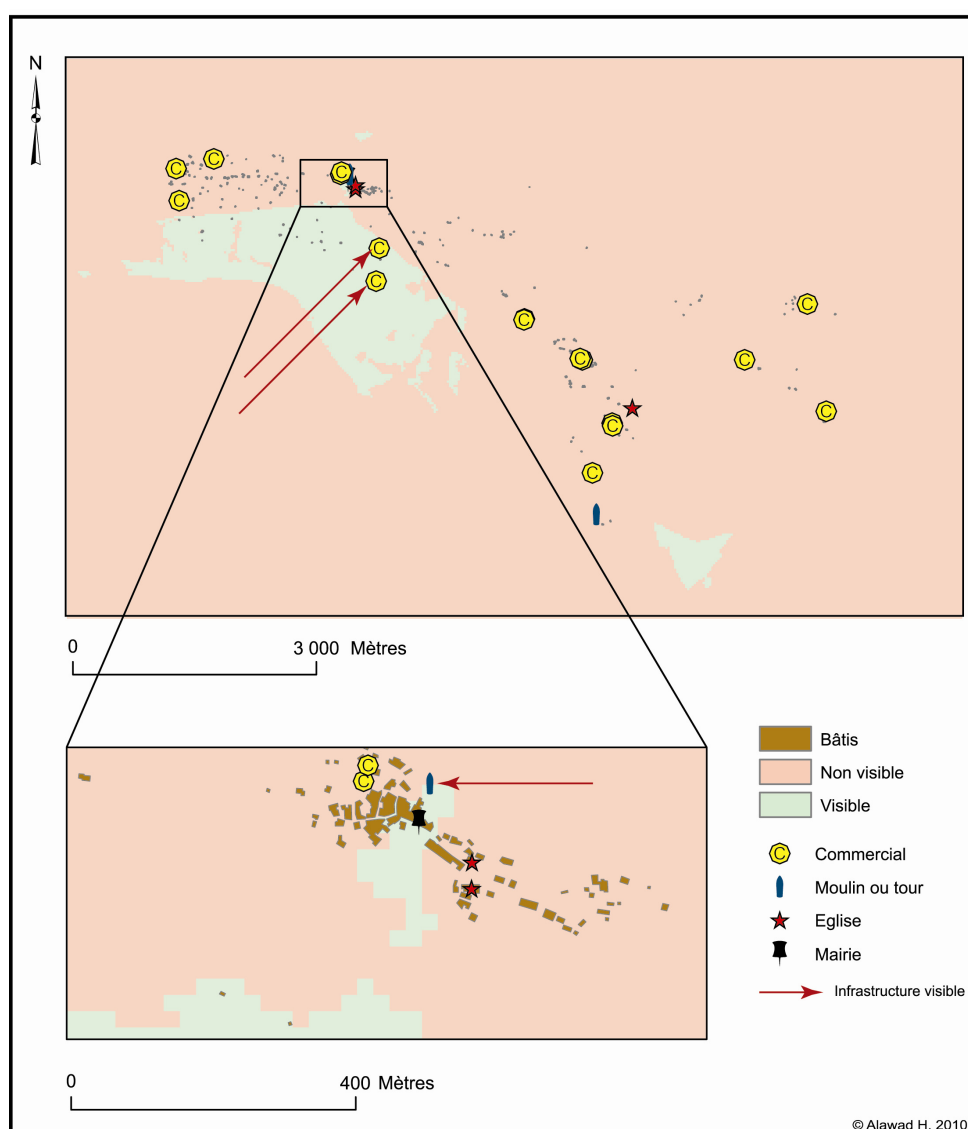


Figure 55. Connexion à Internet des mairies de la région Rhône-Alpes

« La boucle locale constituée de Wi-Fi est une infrastructure du réseau haut débit qui relie les dorsales haut débit à l'utilisateur final. Ces relais Wi-Fi se situent sur des points hauts comme des châteaux d'eau, des églises ou des relais de télécommunication afin de diffuser largement l'information. En effet, l'utilisateur ne peut se connecter que si son antenne d'émission-

réception est en vue directe de l'émetteur »⁵³. Cette antenne récupère le signal et le redistribue en Wi-Fi chez l'ensemble des internautes disposant d'un abonnement et de l'équipement adapté. Le calcul du champ de visibilité à partir du point choisi est une analyse topologique proposée par *ArcGIS*. Cette analyse classe le terrain en deux couleurs différentes. Une couleur uniforme représente la partie visible de l'espace et forme la zone possible à desservir par Wi-Fi (vert), et la seconde (partie non visible) forme la zone blanche de desserte (rose) (figure 56).



⁵³ Carvea, Livre Blanc, *L'internet par satellite ; Le haut débit des zones rurales*, Avril 2010, p. 30.

Pour qu'ils soient desservis par les rayons Wi-Fi qui partent du point de la mairie, les bâtis doivent réaliser les trois conditions de fonction suivantes :

1. S'insérer dans le diamètre de 500 m de la station d'antenne (zone de couverture maximale d'antenne) (figure 57) ;
2. S'intègre dans son champ de visibilité (les bâtis doivent être visibles de l'antenne de distribution des ondes Wi-Fi) ;
3. ne dépasse pas la capacité maximale d'antennes à pouvoir desservir (chaque antenne desservie 25 à 30 abonnés) et garder la bonne qualité de réseaux (HD). L'intégration des relais intermédiaires permet de doubler le nombre d'abonnés.

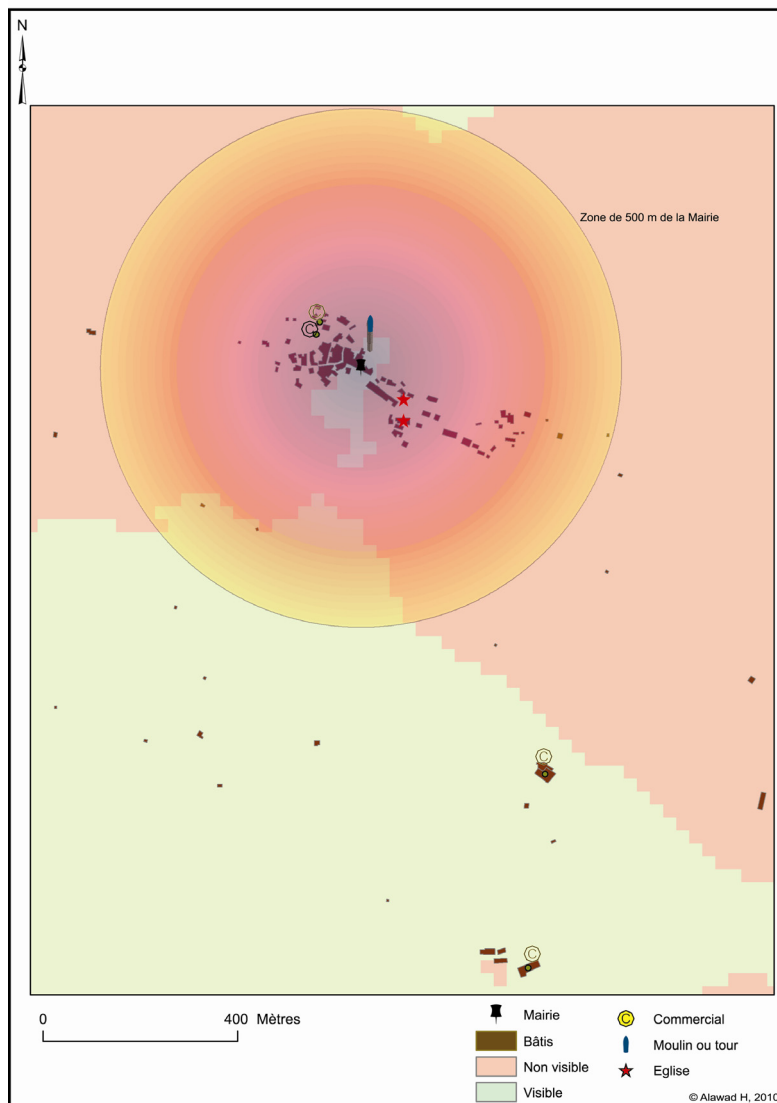
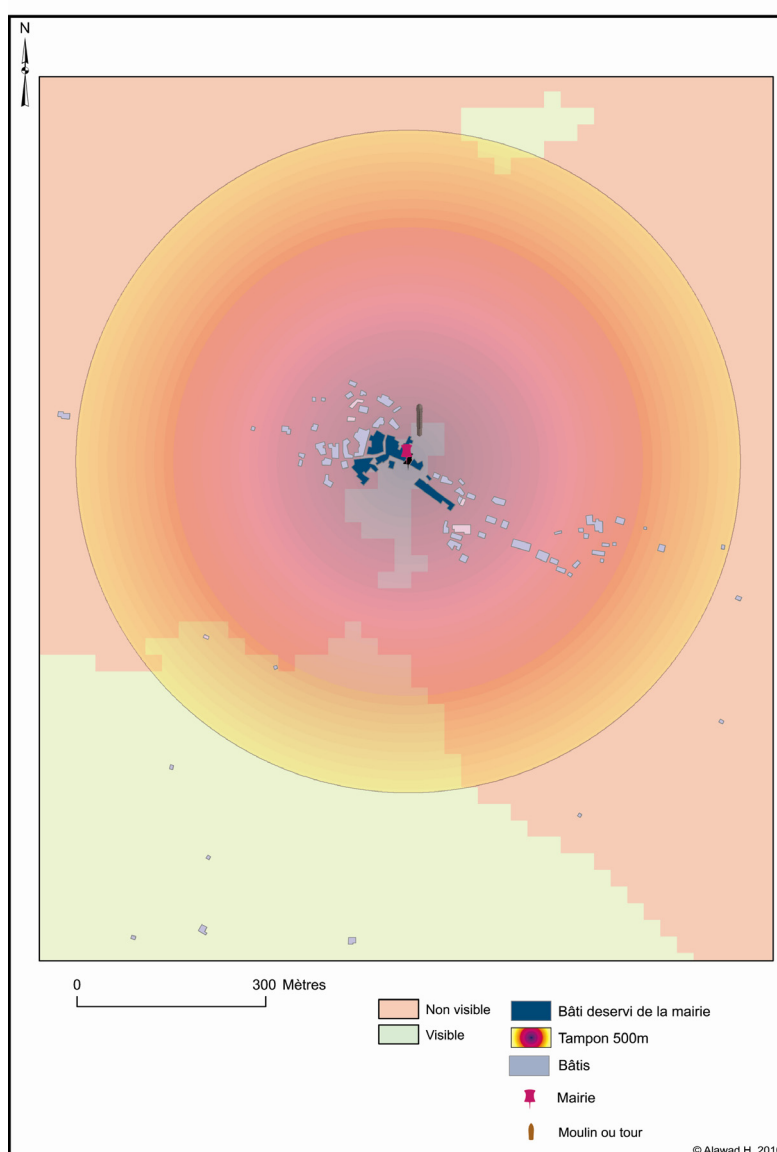


Figure 57. Zone de couverture Wi-Fi de 500 m autour du point d'accès (mairie) et des infrastructures existantes

Les internautes peuvent profiter d'un débit allant jusqu'à 5 Mbits en réception et 512 Kbits en émission. Une vitesse confortable qui peut, certes, varier selon le nombre d'abonnés connectés simultanément, et selon l'utilisation plus ou moins intensive de la bande passante. « *Un seul relais Wi-Fi suffit à alimenter en haut débit une trentaine d'abonnés* » (ARIASE, 2008)⁵⁴. La carte suivante montre les bâtis visibles en couleur bleue. Ils sont bien situés dans la zone de couverture de 500 m et bien visibles du point d'accès proposé (la mairie). Par contre, il faudrait aussi prendre en compte le nombre d'utilisateurs. Ce nombre d'abonnés ne doit pas dépasser 30, sinon le nombre de relais intermédiaires devra être augmenté (figure 58).



⁵⁴ <http://www.ariase.com/fr/news/Wi-Fi-herault-article-1536.html>, mercredi 26 mars 2008

4.7.2. La position stratégique de l'AP (Point d'Accès) dans un espace donné

Le deuxième scénario est de pouvoir trouver le point le plus visible au sein de l'espace d'étude. L'idée ici est de calculer la visibilité des points du terrain à partir d'infrastructures existantes. Pour trouver ce point stratégique, les infrastructures existantes constituent peut-être les endroits idéals pour installer les relais intermédiaires. Par ailleurs, la création d'une nouvelle infrastructure pour l'AP coûtera plus cher à l'opérateur. De ce point de vue, il est important de connaître la visibilité de ce point théorique par rapport aux infrastructures existantes. Une analyse du champ de visibilité a été effectuée pour toutes les infrastructures existantes (18 équipements). *ArcGIS* permet de définir le point le plus visible en tenant compte des champs calculés à partir des infrastructures (ici 9 champs). Ce point garantit la desserte optimale de cet espace (figure 59).

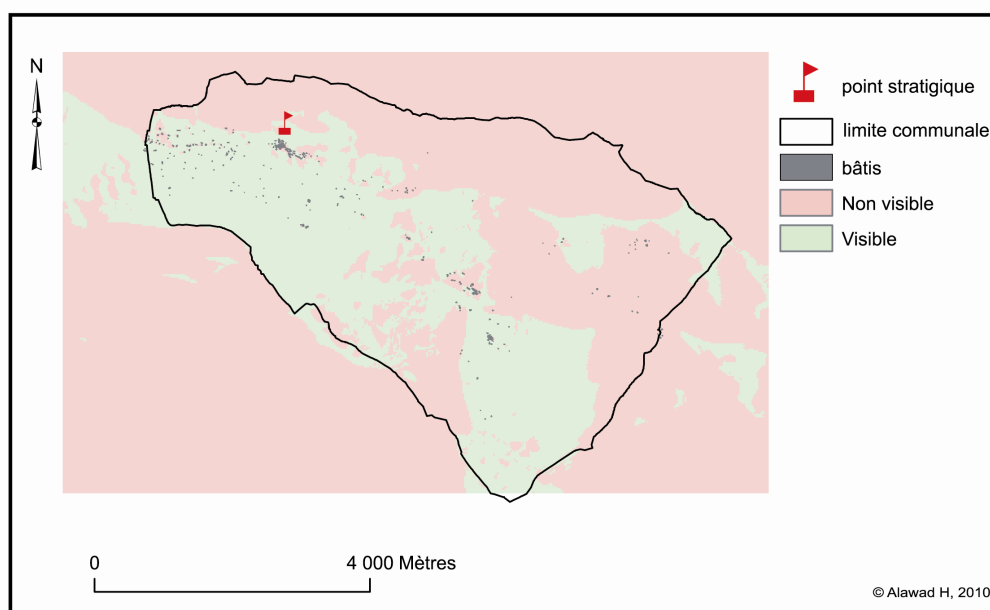
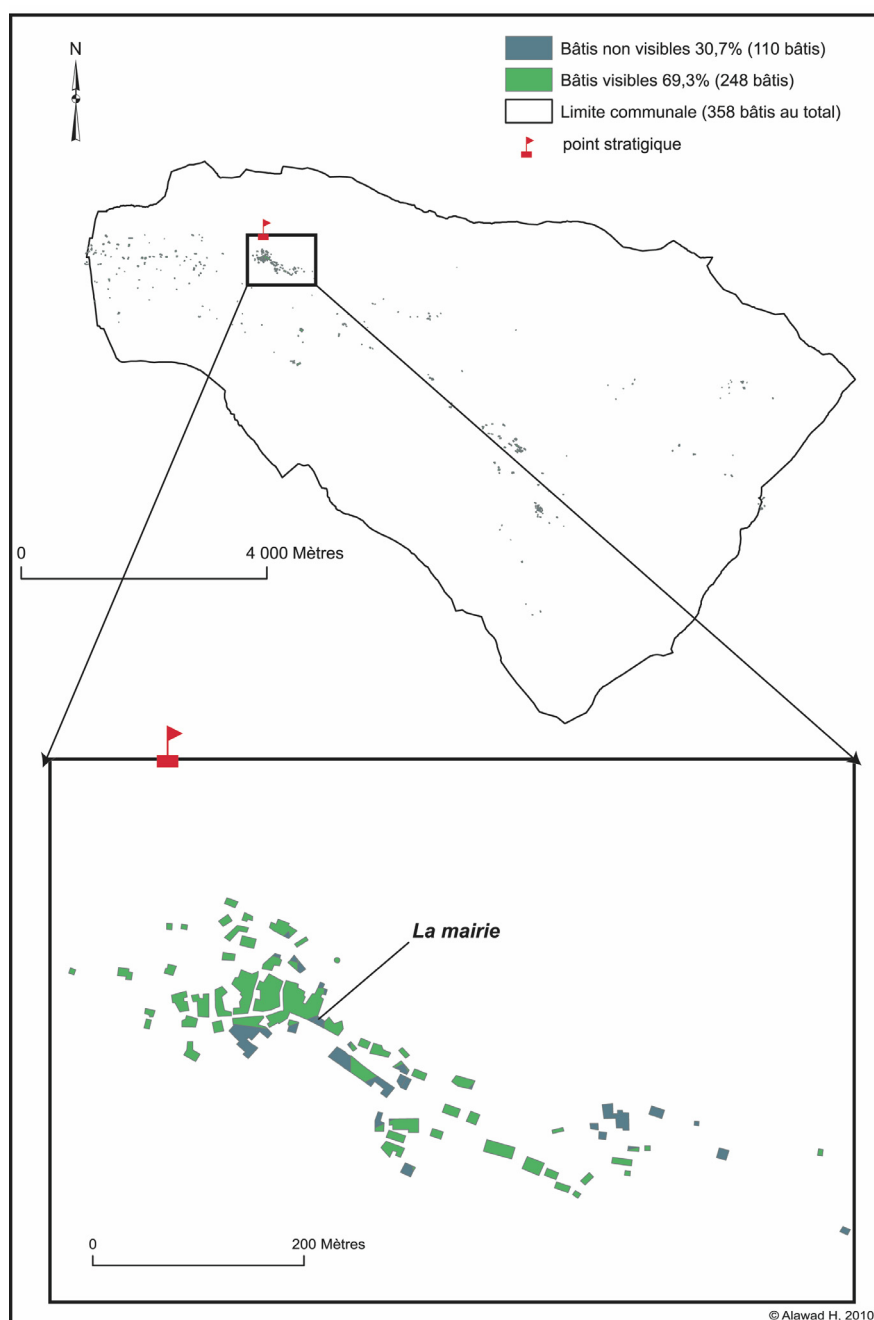


Figure 59. Calcul d'un point de desserte optimale

La carte suivante montre que le point plus adapté pour desservir la majorité du terrain peut couvrir 70% des bâtiments de l'espace étudié (bâtiments indiqués en vert). Par contre, les bâtiments en bleu représentent des entités invisibles à partir de ce point, qui représentent ici 30% du total du bâti présent sur la commune (sur 358 éléments) (figure 60).



4.7.3. Vers une desserte optimale

Pour arriver à une desserte optimale, il est important de connaître la visibilité du point stratégique par rapport au point de connexion (mairie), ou même par rapport à la zone de desserte de la mairie. Cette visibilité assure le fournisseur de réseaux ou d'accès pour le point le plus adapté sur le terrain de pouvoir diffuser ensuite les ondes haut débit sur la majorité de l'espace (Bâtiments). D'après le résultat obtenu de deux démarches précédentes, la mairie

apparaît invisible à partir du point stratégique. Par ailleurs, les bâtiments desservis à partir de la mairie sont visibles du point stratégique. La solution proposée est d'installer un AP à la mairie et un relais intermédiaire sur un des bâtiments de desserte qui soit aussi visible du point stratégique (deuxième AP) pour assurer la continuité du réseau HD (figure 61).

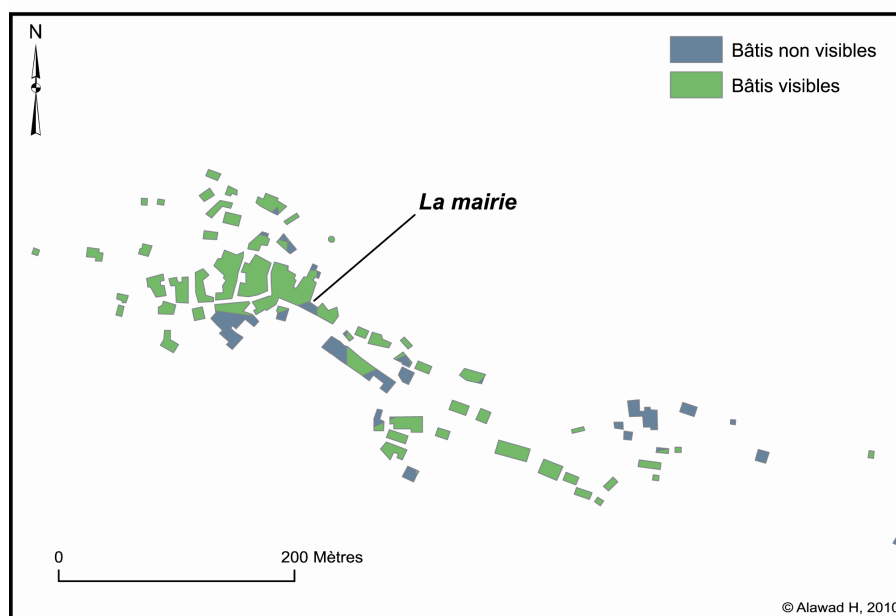


Figure 61. La mairie : un bâtiment invisible par rapport au point stratégique

4.8. Méthode d'estimation de la population communale à partir du bâti

L'aménagement numérique du territoire est marqué par une fracture qui s'explique par l'absence d'infrastructures dans les espaces pauvres d'un point de vue économique ou peu peuplés d'un point de vue démographique (Rallet, 2004). La stratégie des opérateurs, surtout dans les zones blanches, plutôt rurales, où la possibilité d'avoir un nombre important de clients est moindre par rapport aux zones urbaines, est de pouvoir desservir une majorité d'abonnés avec le moins d'équipements et de travaux de génie civil. « Dans les zones denses qui sont définies comme les communes à forte concentration de population, pour lesquelles, sur une partie significative de leur territoire, il est économiquement viable pour plusieurs opérateurs de déployer leurs propres infrastructures, en l'occurrence leurs réseaux de fibre optique, au plus près des logements. Dans la majorité de ces zones, les principaux acteurs du marché ont préparé ou engagé des déploiements » (ARCEP, 2010).

A partir de cette idée, il apparaît important de faire une étude plus théorique qui permette d'envisager le nombre de clients probables à mettre en connexion et leur fournir par une

bonne qualité de service. La carte suivante montre une estimation de population dans chaque bâtiment de la commune de La Roche-sur-le-Buis (figure 62).

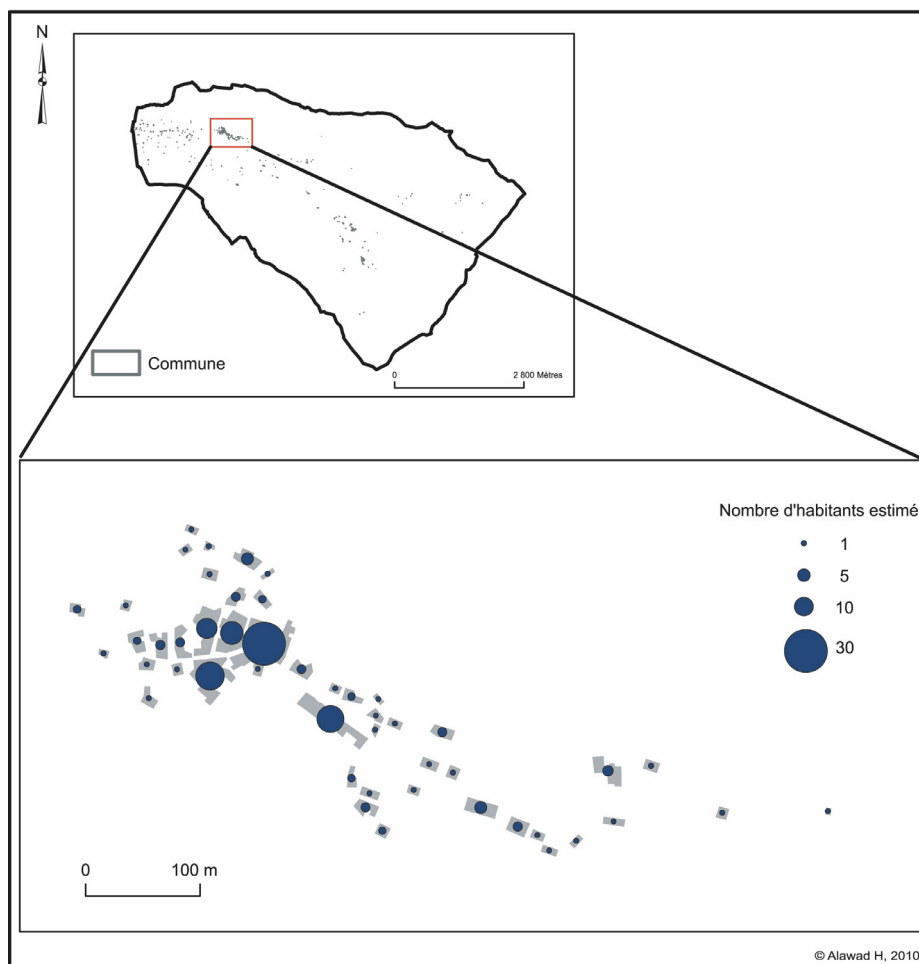


Figure 62. Population estimée dans chaque élément de bâti

Cette hypothèse de calcul a été effectuée sur la totalité des communes drômoises au niveau de chaque polygone (bâtiments). La taille des cellules dépend de la hauteur de chaque bâtiment (variable entre les zones urbaines ou rurales) et de la surface moyenne par personne qui varie également selon l'âge des habitants et le type d'agglomération (figure 63).

Selon cette étude de l'INSEE, la surface moyenne par personne est de 46 m², avec une hauteur entre 2 et 5 m pour chaque étage dans les zones rurales et entre 2 et 3 m dans les zones urbaines. L'inégalité de surface moyenne par personne peut être expliquée par le prix du terrain. D'après l'INSEE, les régions les plus urbaines et peuplées ont un prix plus élevé du terrain en raison de leur densité de la population (figure 64). Les prix moyens sont très

élevés pour l’Ile-de-France (190 euros par m²) mais les prix les plus faibles sont observés pour les régions de l’Auvergne (27 euros) et du Limousin (14 m²).

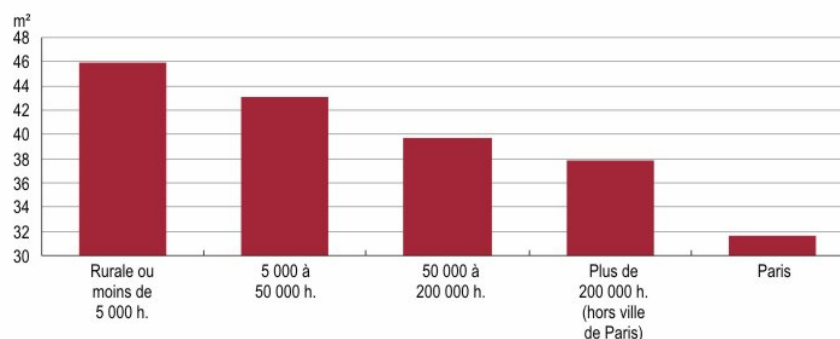


Figure 63 Surface moyenne par personne selon le type d’agglomération (INSEE, 2006)

Régions français	Prix du terrain en euro par m²
Ile-de-France	190
Languedoc-Roussillon	114
Provence-Alpes-Côte-d'Azur	112
Alsace	106
DOM	96
Rhône-Alpes	86
Nord-Pas-de-Calais	60
Pays de la Loire	57
FRANCE ENTIERE	54
Bretagne	53
Picardie	53
Corse	46
Lorraine	45
Champagne-Ardenne	43
Haute-Normandie	43
Centre	41
Aquitaine	40
Midi-Pyrénées	35
Franche-Comté	34
Poitou-Charentes	33
Bourgogne	31
Basse-Normandie	27
Auvergne	26
Limousin	14

Figure 64. Prix du terrain moyen dans les régions françaises (INSEE, 2008)

Le recensement de la population par commune de l’INSEE (1999) permet de valider la méthode d’estimation pour répartir la population communale dans les couches vectorielles du bâti et de calculer les marges d’erreur. Pour les 54 communes drômoises à dominante rurale, un degré d’erreur de moins de 15% a été enregistré. Les plus grands écarts sont observés pour les plus petites communes (moins de 100 hab) et pour la plus peuplée (plus de 8 000 hab), le

degré d'erreur étant supérieur à 50%. La figure suivante montre les résultats obtenus avec une représentation cartographique présentée à l'aide des symboles proportionnels (figure 65).

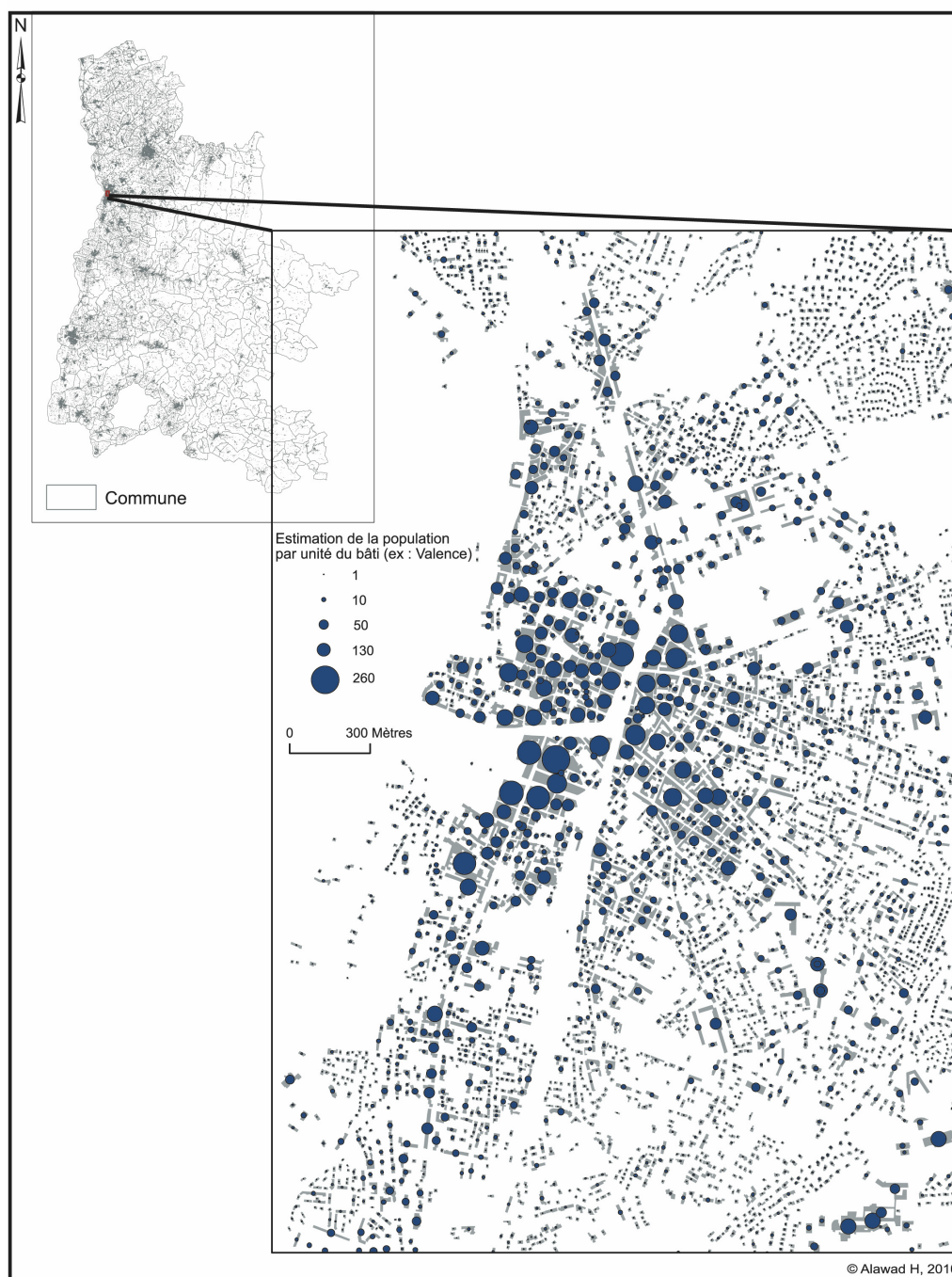


Figure 65. Estimation de la population par unité de bâti en zone urbaine (ex. Valence)

Cette approche démographique est importante car elle permet d'envisager le nombre d'antennes qui vont desservir l'espace, en sachant que chaque antenne doit répondre aux besoins de 25 à 30 d'utilisateurs synchrones de réseaux de haut débit.

Conclusion

La bonne connaissance du fonctionnement des SIG, et en particulier l'utilisation proposée pour mesurer un « champ de visibilité » est pertinente pour définir la meilleure desserte numérique possible par le haut débit. *« Les SIG, surtout lorsqu'ils sont utilisés pour la recherche, ce qui constitue presque toujours un détournement de leur usage ordinaire, sont des systèmes très lourds à faire fonctionner : il faut passer des jours à formater les données, à coder des scripts, à réécrire les requêtes, etc., avant de commencer à produire des résultats exploitables »* (Desbois, 2008).

Les résultats obtenus sur La Roche-sur-le-Buis montrent que le Wi-Fi est bien adapté à la couverture rapide d'une commune où la clientèle est dispersée. Cette technologie semble appropriée à ce type d'espace.

Trois scénarios de desserte par le Wi-Fi ont été envisagés. Le scénario qui propose une desserte optimale et assure un service de haut débit à la majorité de l'espace n'est pas le plus performant d'un point de vue économique. La création d'une nouvelle infrastructure pour installer le point d'accès Wi-Fi entraîne une augmentation des coûts.

La méthode de calcul de la population dans chaque cellule bâtie permet d'estimer le nombre d'abonnements probable. Cette estimation est importante pour envisager le nombre de relais intermédiaires à installer pour desservir les utilisateurs et répondre à un manque de service Internet. Cependant, si la mise en œuvre de ces scénarios de desserte prend en compte des critères géographiques, elle laisse de côté des critères politiques ou environnementaux.

ELEMENTS DE REFLEXION ET PISTES DE RECHERCHE

**Les TIC comme outils de diffusion de données intégrables
dans des Systèmes d'Information Géographique**

Cette première partie de la thèse a permis de traiter la question de la fracture numérique, observable à différentes échelles spatiales, tout en étudiant des scénarios possibles à mettre en place pour résoudre le problème des discontinuités spatiales existant dans les infrastructures numériques à une échelle locale.

Sur le web, une majorité d'internautes se limite à la consultation d'informations. Cependant, des utilisateurs spécifiques souhaitent parfois utiliser des informations en rapport avec leurs domaines d'intérêt et leurs besoins. Pour les géographes, l'accès à des données grand public révèle de deux approches différentes :

- une *approche classique* directe de récupération des données sur des sites spécifiques du Web. C'est le cas par exemple des données statistiques de l'INSEE qui peuvent être intégrées ensuite dans un système d'information.
- une *approche spécifique indirecte* de production de données à partir de données brutes disponibles sur le Web. C'est par exemple le cas d'extraction de données à partir d'images en accès libre à l'aide de techniques de télédétection dans le but de les intégrer ensuite dans un système d'information. Cette dernière approche permet d'élaborer des bases de données répondant aux besoins des chercheurs. L'élaboration de telles données est de plus en plus fréquente pour l'analyse des territoires.

Il existe plusieurs systèmes d'informations pour gérer ces données, pour les saisir, les stocker, les extraire, les analyser et les afficher. Les Systèmes d'Information Géographique sont des systèmes qui gèrent des données spécifiques car géographiques. Les principaux logiciels utilisés aujourd'hui sont *ArcInfo*, *Arcview*, *GRASS*, *MapInfo*, *IDRISI*, *GéoConcept*...

Quatre types d'éléments géographiques sont considérés dans les données traitées par les SIG : les données géométriques, les données descriptives, les données graphiques et les données associées. L'accès à ces données est plus ou moins facile : les données n'existent pas toujours ; leur prix et leur qualité sont très variables.

Un des usages courants des systèmes d'information géographique est de présenter de façon plus ou moins réaliste un environnement spatial en se basant sur des primitives géométriques : point, ligne, polygones (*vecteur*), ou maillages (*raster*).

La première partie de cette thèse s'est principalement basée sur les données topologiques de l'IGN. L'existence de ces données permet par exemple de réaliser un projet de desserte du territoire par les TIC. L'existence d'une source des données comme celle de l'IGN en France constitue un élément essentiel et non négligeable de réalisation de travaux. Si l'on s'intéresse au bâti, les bases de l'IGN permettent de connaître l'adresse, le nombre d'étages, la fonction du bâtiment et le nombre de ses occupants. Il existe un grand nombre d'informations géographiques, même à une échelle très fine proposée par l'IGN (figure 66).

Le RGE	Ensemble de données cohérentes et complémentaires, servant d'infrastructure sur l'ensemble du territoire national, pour localiser ou être enrichi de données thématiques propres à de multiples applications métiers.
BD ORTHO®	L'objectivité de la photographie au service de la cartographie décisionnelle. L'orthophotographie est un outil numérique indispensable pour gérer votre territoire, valoriser vos projets d'aménagement, enrichir vos données thématiques.
BD TOPO®	La base de données de référence comprenant la description physique tridimensionnelle du territoire national ; elle est la composante topographique nécessaire à la constitution de systèmes d'informations localisées.
BD PARCELLAIRE®	La base de données élaborée à partir des données numériques du cadastre fournies par la Direction Générale des Impôts dans le cadre d'une convention pluriannuelle entre la DGI et L'IGN.
BD ADRESSE®	La base des adresses postales et des noms de voies. Spécifiée en 2003, des disponibilités partielles arriveront dès 2004.
BD ALTI®	Référentiel du relief sur la France, la BD ALTI® décrit la forme du terrain à différentes échelles (du 1 : 50 000 au 1 : 1 000 000) et peut être déclinée en produits multiples adaptés. Elle est composée de courbes de niveau et de points cotés par numérisation de cartes et restitution photogrammétrique de photos aériennes.
BD CARTO®	La base de données cartographiques de référence. Utilisée de l'échelle départementale (1 : 50 000) à l'échelle régionale (1 : 250 000), elle décrit l'ensemble des informations présentes sur le territoire métropolitain et les départements d'Outre-mer
SCAN IGN	Les images numériques géoréférencées, immédiatement utilisables pour localiser vos informations, repérer vos interventions, habiller vos données.

Figure 66. Exemple d'offre de banques de données spatiales (IGN, 2005)

Mais ce contexte institutionnel est particulier. De nombreux travaux ont ainsi été engagés pour constituer, voire créer des bases de données comparables, ou en tous cas valides au regard de leur utilisation, et accessibles. Des outils en accès libre sur Internet permettent ainsi d'accéder à toutes sortes d'informations. Par exemple, pour les géographes, le logiciel *Google Earth* et des sites Web comme celui de *Géoportail* sont considérés comme des sources importantes de données. De tels outils peuvent par ailleurs être couplés à des plateformes de diffusion, voire de gestion, qui sont plus ou moins élaborées selon les besoins des utilisateurs⁵⁶ (figure 67).

⁵⁶ Par exemple, dans le département de Seine-Saint-Denis, la Cité des Sciences a réalisé un travail de diffusion de données géographiques basé sur le protocole WMS (*WebMapService*) pour différentes applications SIG dans le cadre d'une Infrastructure de Données Spatiales (Bouillot et Delhorbe, 2009).

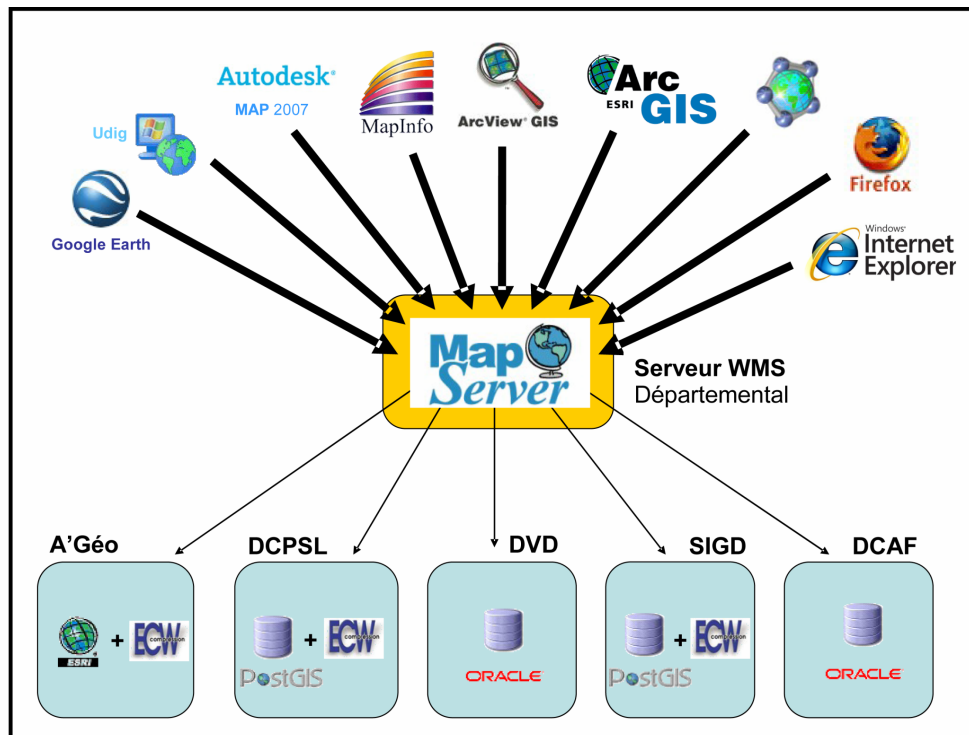


Figure 67. Organisation de l'interopérabilité des SIG au CG 93 autour d'un serveur cartographique : des logiciels différents lisent les données produites avec d'autres outils (Bouillot, 2009)

D'après Germain (2009), le lien entre l'évolution d'Internet et les SIG peuvent être entrevus à travers une fonction de « géo-management » du Web, c'est-à-dire une gestion - à distance et de plus en plus interactive, voire collaborative - de données géolocalisées accessibles par le web et intégrables dans des SIG (figure 68).

Quelque soient les approches géographiques et les besoins spécifiques de données liées à ces approches, les outils de géo-localisation sont déjà disponibles sur le Web. Les Système d'Information Géographique permettent la consultation, la manipulation et la diffusion de ces données spatialisées. Ils sont fournis avec un ensemble de couches d'information structurées par thèmes. Cette structure est ordonnée car décrite dans une base de données ; elle souligne les différents niveaux de perception, les thématiques, etc. et se veut d'une grande simplicité car l'utilisateur peut ajouter ou enlever une couche d'information ou un thème.

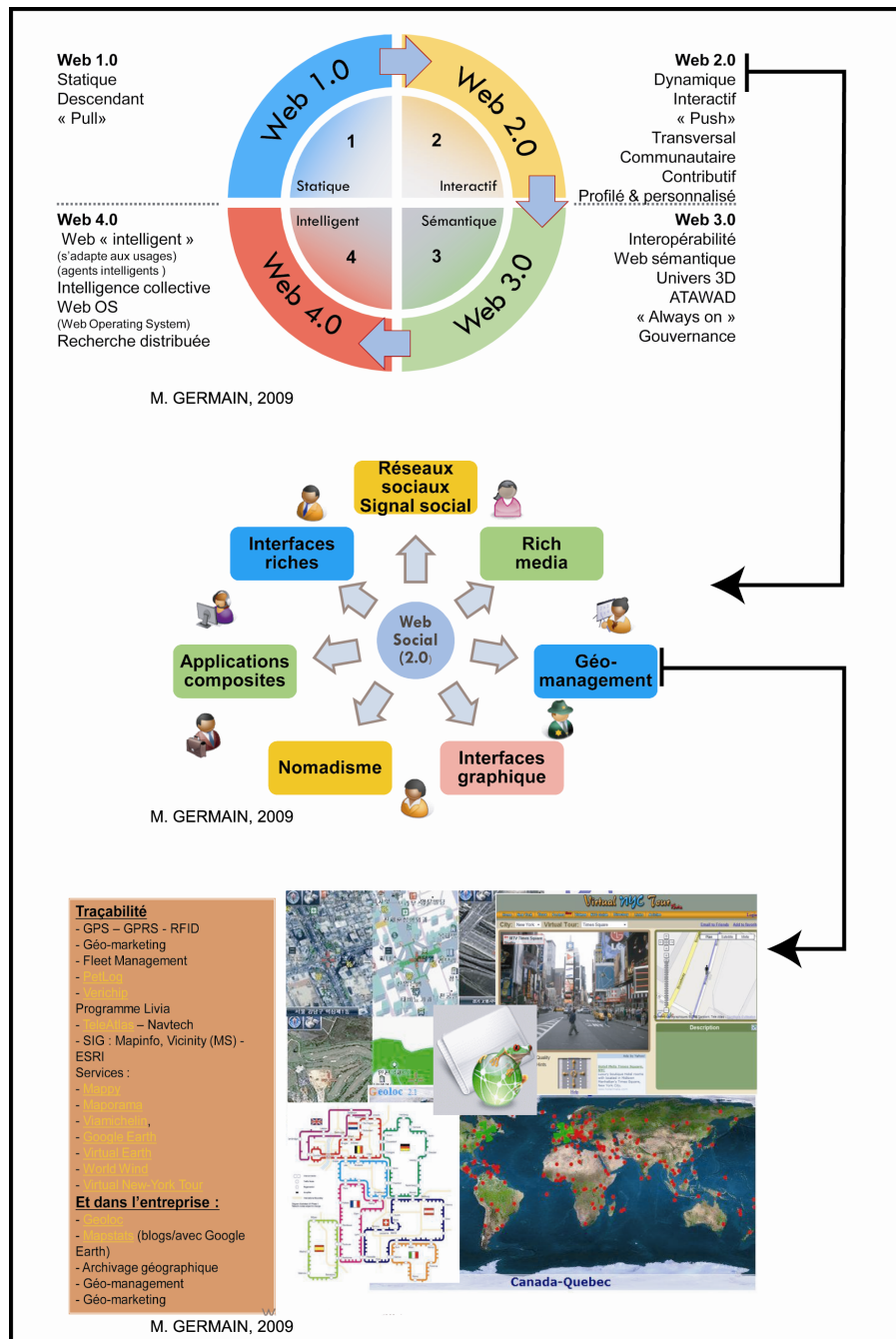


Figure 68. La géo-localisation, un service apparu avec l'évolution du web (web 2.0)

Pour Olivier Jonas, qui s'intéresse à la relation entre les TIC et le territoire, les TIC ont un « *extraordinaire potentiel de restructuration de l'espace géographique et de recomposition des relations entre les territoires* » (Jonas, 2008). A partir d'une cartographie de la fracture numérique qui semblait plus particulièrement liée à Internet, l'auteur propose de relativiser la portée de son propos. En effet, il y a un accès inégal aux Technologies de l'Information et de la Communication dans le monde. Cette inégalité est notamment mesurée

par l'Union Internationale des Télécommunications à travers un indice d'accès numérique. Cet indice a été utilisé dans des cartes thématiques qui localisent la nature et l'importance des phénomènes d'inégalités territoriales de diffusion des TIC. L'utilité des SIG se retrouve dans ce type d'articulation, entre des données grand public, collectées par les TIC, et des besoins de données traitées, « augmentées » et rediffusables, mais nécessitant des fonctions présentes dans les SIG.

La présentation cartographique des données se retrouve aussi dans l'opération d'extraction de données permises par les TIC. Dans tous les cas, la carte est un moyen efficace d'exprimer des idées et de repérer des phénomènes qui ne le seraient pas, ou le seraient plus difficilement, par d'autres moyens. En ce sens, elle permet au chercheur de s'exprimer efficacement, mais aussi au lecteur de mieux comprendre les phénomènes. La réalisation d'atlas numérique vise à rendre ainsi accessible aux décideurs, aux opérateurs et aux chercheurs un recueil d'informations cartographiques sur l'état de la diffusion des TIC

Les questions qui se posent alors sont les suivantes : Jusqu'à quel point les TIC permettent-elles d'obtenir des données pour des travaux scientifiques ? Est-ce que les TIC permettent d'accéder à des données spécifiques à toutes les échelles spatiales, en particulier à une échelle fine où les données sont souvent plus difficiles à trouver ? Est-ce que les logiciels de géo-localisation, du type *Google Earth*, facilitent l'extraction de données, nécessaires ensuite pour étudier la fracture numérique ? C'est à ces questions que tentera de répondre la seconde partie de cette thèse.

CONCLUSION DE LA PARTIE 1

La diffusion numérique d'Internet devient un phénomène géographique si on se focalise sur son déploiement spatial dimensionnel. Les relations entre les TIC et l'espace permettent également d'appréhender, par référence à un autre mode de communication, un autre réseau, inscrit sur le territoire, mais beaucoup plus ancien et ayant fait l'objet de nombreux travaux : le transport. Le développement numérique est lié aux dynamiques locales engendrées par l'implantation des réseaux d'Internet et par leurs répartitions spatiales. Cette répartition est observée à travers l'étude des infrastructures qui traversent et desservent les territoires dans l'espace. La relation entre télécommunications et territoires a donc été approchée sous l'angle de ses effets structurants : l'abolition de la distance spatiale permettrait la délocalisation d'activités industrielles, et la substitution au déplacement physique conduirait à une forte réduction de la mobilité individuelle, les flux virtuels remplaçant les flux physiques de personnes et de certaines marchandises.

Les TIC peuvent jouer un rôle important pour renforcer, développer, diversifier et créer des activités existantes surtout dans les zones rurales qui sont mal desservies et pour lutter contre la pauvreté dans ces zones.

Les effets spatiaux des TIC, et plus particulièrement les télécommunications et le réseau Internet, assurent l'instantanéité des échanges immatériels et des communications entre les personnes, quelle que soit leur localisation sur la planète. Cette contraction de l'espace et du temps s'accompagne d'une démocratisation de l'accès aux moyens de communication. Notre perception de l'espace géographique se construit aujourd'hui sur cette nouvelle donne technique et économique qui semble gommer les contraintes de distances spatiales et recomposer les territoires par la puissance commutative des réseaux d'information et de télécommunication. La création d'un site Internet s'inscrit au niveau mondial, le numérique ne connaissant ni les frontières ni même la distance géographique. A cet égard, la diffusion des TIC semble être un processus irréversible qui touche progressivement toutes les régions du monde. Pourtant, les télécommunications renforcent les inégalités territoriales : les nouveaux réseaux s'implantent de préférence dans les zones où sont installées les entreprises et où se concentrent les populations. Si, dans un deuxième temps, les techniques et les réseaux se diffusent, amenuisant la valeur ajoutée des réseaux de première génération, de nouveaux besoins vont apparaître avec des applications qui vont se déployer de préférence dans les zones les plus développées. Les nouvelles technologies se renforcent donc dans les espaces déjà les plus favorisées économiquement.

En moyenne, en France, 40 communes par département ne sont pas encore en zone éligible (Assemblée Générale, 2006). Dans le cas de la Drôme, en reprenant ici les chiffres évoqués dans le rapport d'ARIASE, 78% des communes drômoises sont desservies seulement par 1 ou 2 NRA et seulement 8% de ces communes font parties de l'unité urbaine. En revanche, 19% des communes drômoises, dont 27% correspondent à des unités urbaines, sont desservies par 3 ou 4 NRA. Les communes drômoises ayant le maximum de services ont une couverture assurée par 5 à 7 NRA, ce qui représente uniquement 1,6 % de la totalité des communes. En 2009, pour France Télécom, ce sont 60% des communes drômoises (soit 222 communes) qui ont un taux de 95% d'éligibilité au haut débit. En revanche, 15,2 % des communes (56 communes) conservent un taux d'éligibilité inférieur à 50%.

L'analyse a ensuite été menée à une échelle locale. La commune étudiée a été choisie en fonction de la situation démographique de cette entité administrative et de la connaissance technique de la technologie de desserte correspondante. La commune de La Roche-sur-le-Buis est apparue pertinente en se basant sur plusieurs critères, notamment l'importance de la demande pour desservir une commune en forte croissance démographique depuis les quarante dernière années.

Un intérêt économique conditionne le passage de la phase théorique à la phase pratique pour donner de la plus-value à cette recherche. Dans ce contexte, une analyse fondée sur le calcul du « champ de visibilité » a été privilégiée.

La méthodologie de desserte propose trois scénarios possibles de desserte par le Wi-Fi. Le scénario qui propose une desserte optimale et qui assure un service de haut débit pour le plus grand espace possible nécessite l'installation d'un point d'accès Wi-Fi et donc une nouvelle infrastructure. Cette solution est inadaptée d'un point de vue économique car elle peut être plus coûteuse qu'une autre, notamment celle consistant à utiliser une infrastructure existante mais avec une desserte de réseaux moins importante.

L'estimation du nombre de personnes potentiellement présentes dans chaque bâtiment permet ensuite de définir, toujours dans la commune de La Roche-sur-le-Buis, le nombre d'abonnements probables. Cette estimation est importante d'un point de vue économique car elle offre la possibilité d'envisager le nombre de relais intermédiaire pour satisfaire les demandes de connexion par les utilisateurs. Ces solutions de desserte par la technologie Wi-Fi sont utiles car ils répondent à un déficit de desserte du service Internet.

Cette première partie de thèse avait pour objectif d'étudier les discontinuités territoriales liées à la desserte du service Internet et de montrer les moyens à mettre en œuvre pour tenter de réduire ces inégalités. Les solutions envisagées sont importantes car Internet est devenu un service mondial, permettant un accès à un nombre considérables d'informations : *« Internet permet à la fois de mettre à la disposition de tous les utilisateurs de grandes quantités de données, d'en simplifier la mise à jour, et d'intégrer à la cartographie ou à l'imagerie des informations issues des différents capteurs ou fournies par les utilisateurs »* (Desbois, 2008).

Durant la dernière décennie, le monde de l'image a connu une véritable révolution à travers certains types de logiciels et Internet qui représentent une partie non négligeable des sources d'images numériques mondiales de bonnes qualités visuelles. Ces sources diffusent des images variées du monde entier et de façon gratuite. *« La cartographie numérique est d'autant plus populaire sur l'Internet que sa consultation est la plupart du temps gratuite et que les concepteurs de sites, dans la majorité des cas, peuvent utiliser sans payer des interfaces toutes faites »* (Desbois, 2008).

L'extraction des données topographiques à partir des images satellitaires ainsi que la technique de traitement et d'analyse d'images en télédétection sont essentiellement connues par les géographes et les télédéTECTEURS. Les images numériques et les méthodes de traitements sont d'une qualité telle qu'on n'aurait pas pu les imaginer il y a encore une dizaine d'années. Les questions essentielles sont, en effet, de savoir ce que l'on attend d'un traitement d'image et comment tirer partie d'une façon optimale de cette formidable source d'informations (Voiron, 1995). L'impératif est donc plus méthodologique que technique. Le besoin d'avoir les données géographiques, l'existence d'une telle source d'images gratuites, et la grande variété des méthodes d'analyses d'images, nous amènent au second axe de cette thèse.

La deuxième partie présente un état des connaissances des méthodes existantes pour l'extraction des données par différentes techniques de traitement de l'information. Ces méthodes seront appliquées aux images en accès libre fournis par *Google Earth* et une nouvelle méthode d'extraction du bâti sera également présentée.

PARTIE 2

**Analyse du bâti à l'aide des TIC (*Google Earth*)
pour la réduction de la fracture numérique**

Introduction de la deuxième partie

L'analyse visuelle des images est la base de toute analyse de télédétection. L'étude stéréoscopique des photographies aériennes représente la première phase dans l'analyse d'images des formes terrestres. Les techniques utilisées ont longtemps cherché à généraliser le travail de l'analyse visuelle, qui fonctionne à partir d'une bibliothèque mentale d'objets où sont codés les formes et les couleurs. Ce travail correspond en partie à la philosophie des classifications multi-spectrales. L'œil humain appréhende également la répétition des formes, leur organisation et leur structure. La connaissance du milieu permet par ailleurs de passer de la forme de l'objet à une hypothèse sur son usage. Les études portant sur la mise en évidence des morphologies urbaines tendent à reproduire ce schéma intellectuel (Sabine, 1999).

La photo interprétation visuelle reste une forme d'analyse qui a profité d'un renouveau grâce à l'arrivée des images satellites multi-spectrales. Il est en effet possible d'assembler les canaux au sein de compositions colorées en jouant sur les caractéristiques de l'objet au sein des bandes spectrales (Weber, 1995). La détermination des formes d'occupation du sol ou la retranscription de la réalité du terrain reste son principal objectif ; elle est particulièrement sollicitée en milieu urbain car il s'agit d'un espace complexe où forme et usage n'ont pas de lien direct. Cette approche est basée sur la reconnaissance d'objets grâce à un raisonnement par lequel on repère des zones homogènes à partir d'une couleur, d'une texture et/ou d'une structure. La caractérisation de ces zones et l'examen de leur environnement permettent l'identification d'unités géographiques plus ou moins ressemblantes, confirmant ou infirmant les hypothèses émises au départ. Une interprétation correcte nécessite de disposer de bonnes connaissances du contexte géographique de la zone étudiée.

Les images de photo-interprétation peuvent être analysées sur un tirage papier (photographies aériennes, images satellites) ou directement à l'écran (photographies aériennes scannées et images satellites numériques). Le recours à la vision stéréoscopique est le seul moyen permettant une exploitation totale des données fournies par la photographie. L'acuité de l'interprétation dépend plus de la netteté de la photo que de son agrandissement. Beaucoup de travaux ont été faits pour élaborer une méthode automatisée d'extraction de contenu d'images issues de la télédétection. Néanmoins, cet objectif est loin d'avoir été atteint, en

particulier dans le milieu urbain à cause de sa forte hétérogénéité (Alkalifeh, 2008) ; celle-ci pose problème dans le processus d'extraction automatique (la classification) de l'occupation du sol (Davis et Schaub, 2005 ; Martinuzzi *et al.*, 2007 ; Puissant et Weber, 2004 ; Ackermann *et al.* 2004 ; Gadal, 2001 ; Gadal, 2003). En effet, par rapport à un milieu non urbain, la qualité de la classification apparaît bien plus faible (Donnay *et al.*, 2001). La classification résulte des traitements d'images de télédétection. Le traitement d'image peut aujourd'hui être envisagé à partir de nombreux logiciels comme *Erdas*, *Irisi*, *Imagein*, *Envi Photofiltre*, *Gimp*, *Imagemagick*, *Wiselimage*, *Multispect*, *eCognition* (...) par exemples.

Plusieurs méthodes d'analyse sont alors possibles pour faire des classifications de pixels. Le principal problème de la classification est la pertinence et la qualité des typologies à l'origine des classes. En effet, à l'intérieur des nomenclatures usuelles, les classes sont souvent mixtes et interchangeables (Weber, 2001). Par ailleurs, il existe un décalage entre l'information proposée par l'image et l'information attendue et nécessaire pour l'analyse d'un espace donné. Ce décalage est particulièrement flagrant en milieu urbain : il s'agit de la différence entre couverture du sol et utilisation du sol. La couverture du sol correspond aux éléments physiques qui le recouvrent tandis que l'utilisation du sol est caractérisée par l'usage que la société en fait. Il peut exister un lien direct entre la couverture du sol (donc plutôt perçue comme de l'occupation du sol) et une valeur de réflectance, traduite à travers une signature spectrale. Certaines méthodes enrichissent la classification spectrale afin d'obtenir l'information désirée : ajout d'une information texturale (Eberhard, 1997), croisement avec une information fonctionnelle (Assako Assako, 1995).

La nomenclature CORINE Land Cover, établie à une échelle européenne, utilise un système arborescent pour déterminer des classes d'occupation du sol, découpées en 5, 12 ou 40 classes. La nomenclature démarre sur des classes simples : bâti / agricole / industriel / milieu naturel / eau et elle se complexifie progressivement jusqu'à obtenir des classes proches des modèles d'occupation du sol utilisés en urbanisme (Weber, 1995). Un type d'utilisation du sol peut être caractérisé par l'assemblage d'objets qui lui sont caractéristiques (Barnsley *et al.*, 2001). Dans un premier temps, on détermine les objets eux-mêmes puis leurs relations comme leur concentration. Ce type d'analyse requiert au préalable la création de modèles d'objets théoriques.

Cette deuxième partie de la thèse porte précisément sur la recherche de solutions pour construire des bases des données spatiales, en se focalisant sur le bâti tout en s'aidant des techniques de la télédétection et des images satellitaires en accès libre (*Google Earth*).

« Mais c'est surtout avec le développement récent des applications de visualisation en ligne de données géographiques comme Google Earth ou Google Maps, et de la généralisation de l'intégration de ces applications dans les pages web, par exemple pour la recherche d'adresses ou pour la localisation du lectorat d'un forum, que la géographie numérique a réellement investi la toile » (Desbois, 2008).

La télédétection constitue une source d'information importante pour extraire, traiter et analyser des photos numériques (Weber, 2007). Les analyses de la première partie de la thèse ont été menées sur les données issues de la BD TOPO © IGN. Les méthodes classiques d'extraction de données du bâti, à l'aide d'un logiciel de traitement d'images, et une nouvelle méthode basée sur les fonctionnalités d'un logiciel SIG, seront testées à plusieurs échelles selon les buts recherchés. L'utilisation de *Google Earth* comme source d'images permet de choisir des exemples d'application dans le monde entier. Les images choisies dans cette thèse sont prises en France (pour valider les expérimentations) et en Syrie (pour expérimenter des extractions dans des espaces dépourvus de données). Malgré le grand choix d'images proposées par *Google Earth* et malgré les nombreuses méthodes d'extraction basées sur des techniques de Photo-Interprétation Assistée par Ordinateur (PIAO), il est préférable d'avoir une connaissance géographique des phénomènes étudiés pour bien interpréter l'image sur laquelle on travaille (Afidegnon, 1998).

Le recours à cette technique (PIAO) est limité par la qualité spectrale des images numériques. Une bonne qualité repose sur une bonne résolution d'image et permet d'aborder plusieurs thèmes. La bonne résolution spatiale est une notion relative qui dépend de l'échelle, du thème et du but de l'extraction (Robin, 2002). De façon pratique, c'est celle qui permet d'extraire ce que l'on attend de l'image étudiée. *« Pour une problématique donnée, il faut rechercher la bonne résolution qui n'est pas nécessairement la plus fine »* (Labbé, 2006). La qualité de l'image est variable d'un espace géographique à l'autre, en fonction de la source ou de plusieurs paramètres du capteur d'image. Ces paramètres sont techniques ou temporels ou les deux ensemble.

L'utilisation d'un logiciel de visualisation d'images en accès libre (*Google Earth*), comme source d'images numériques, permet de travailler sur des espaces hors connexion

Internet après avoir récupéré des images par Internet. Pour pouvoir accéder à ce logiciel libre, il est indispensable d'avoir un accès Internet haut débit. L'objectif est ici de proposer une nouvelle méthode techniquement accessible pour récupérer les données spatiales à l'aide de systèmes d'information géographique.

CHAPITRE 1

Télédétection et interprétation des images numériques

Introduction

Avant d'exposer les méthodes d'extraction des données des images numériques, il est important de comprendre la structure et les caractéristiques de l'information contenue dans des images. La compréhension de ces éléments renvoie aux notions fondamentales de la télédétection et à ses différentes techniques pour capter et analyser les images numériques. Ce chapitre expose les principes de télédétection dans la fabrication d'images spatiales numériques et la détermination de leur qualité visuelle. La technique de photo-interprétation est considérée comme un outil important pour interpréter l'image d'un point de vue textural mais aussi structurel. Les perturbations géométriques et radiométriques des images numériques peuvent aussi être des éléments modificateurs d'une image brute. La source joue alors un rôle important dans la qualité spectrale des images et doit par conséquent être prise en compte en amont des analyses.

1.1. *Notions fondamentales de télédétection*

La télédétection est l'ensemble des connaissances et des techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci.⁵⁷ De façon plus restrictive, le terme se rapporte à la détection, la mesure ou l'acquisition d'informations sur un objet ou sur un phénomène par l'intermédiaire d'ondes électromagnétiques

1.1.1. Rayonnement électromagnétique (REM) et spectre électromagnétique

La télédétection porte sur deux composantes du rayonnement électromagnétiques que sont la longueur d'onde et la fréquence. Ces derniers sont inversement proportionnels : plus la longueur d'onde est petite, plus la fréquence est élevée, et plus la longueur d'onde est grande, plus la fréquence est basse (figure 69).

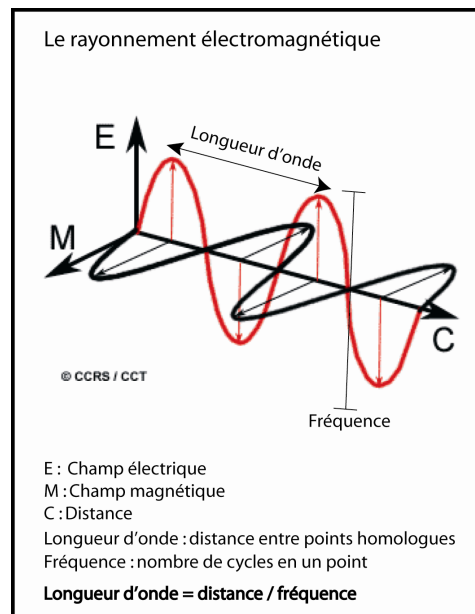


Figure 69. Le rayonnement électromagnétique

L'œil humain ne peut voir qu'une plage limitée du spectre. Les satellites, en revanche, peuvent enregistrer une grande gamme de longueurs d'ondes : le visible, l'infrarouge, les micro-ondes. La figure suivante montre les différents domaines du spectre électromagnétique

⁵⁷ Dictionnaire des termes normalisés des sciences et techniques (JO)

utilisés par la télédétection et les capteurs pouvant être utilisés en fonction de ces derniers (figure 70). La décomposition du rayonnement électromagnétique, en termes de fréquence, constitue le spectre électromagnétique.

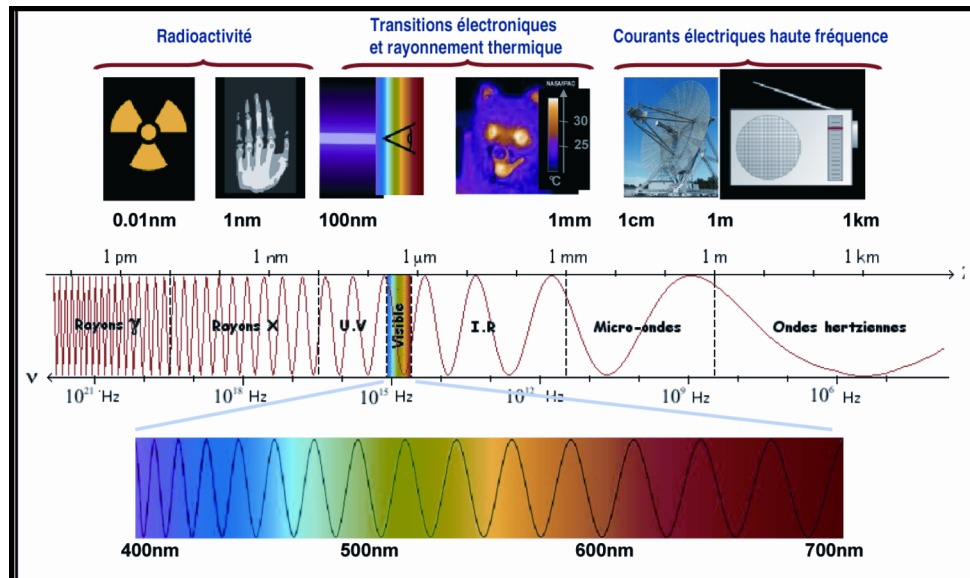


Figure 70. Le spectre électromagnétique (Durrieu, 2009)

Tout corps dont la température est supérieure au zéro absolu est un émetteur de rayonnement électromagnétique. Le rayonnement émis par ce corps qui arrive sur une surface est réfléchi, absorbé ou transmis par réfraction suivant le type de surface rencontrée. La somme de ces trois types de rayonnement est égale au rayonnement incident (figure 71). La réflectance est une mesure de la capacité d'une surface à réfléchir l'énergie incidente. Autrement dit, la réflectance est le rapport entre l'énergie solaire réfléchie et l'énergie solaire incidente sur une surface. Par exemple, une réflectance de 100% signifie que la surface en question réfléchit toute l'énergie solaire dans l'atmosphère et n'en absorbe aucune fraction (comme un miroir). La réflexion à la surface d'une cible dépend du rapport entre la longueur d'onde et les irrégularités de la surface. La réflectance a une direction qui est déterminée par la position de la source d'énergie et par le capteur.

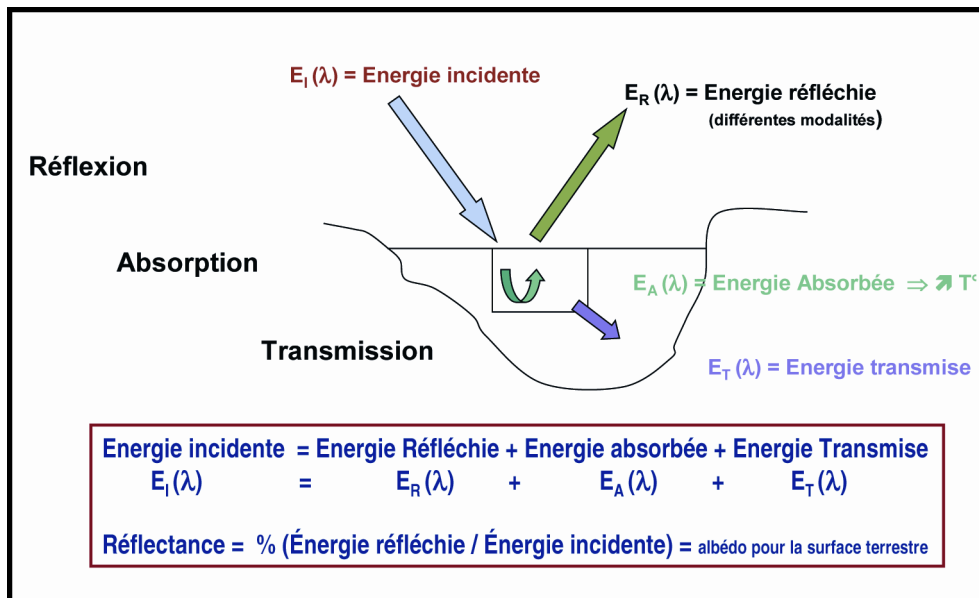


Figure 71. Rayonnement de la cible et réflectance (Durrieu, 2009)

1.1.2. Rayonnement et spectre électromagnétique

Le rayonnement électromagnétique, de nature vibratoire, peut se définir comme la superposition de radiations monochromatiques indépendantes. Chaque radiation se caractérise par sa longueur d'onde, c'est-à-dire la distance que parcourt la lumière pendant une vibration. Le rayonnement électromagnétique se définit comme un spectre continu, allant des rayons cosmiques (10^{-13} nm⁵⁸) aux ondes radioélectriques (1 013 nm) (figure 72). Cependant l'observation de la Terre depuis l'espace n'est pas possible sur toute l'étendue du spectre électromagnétique car la propagation des rayonnements est perturbée par la traversée de l'atmosphère (phénomènes d'absorption, de réflexion et de diffusion).

Les zones de spectre de moindre absorption constituent les fenêtres de transmission atmosphérique utilisables par la télédétection passive (figure 73) : celle-ci se focalise sur les parties visibles situées dans une gamme de longueur d'onde comprise entre 400 et 700 nm.

⁵⁸ Nanomètre

Domaines spectraux	Longueurs d'onde	Appareils de télédétection	
<i>Ultra violet</i>	290 nm (*) 390 nm	Scanneur ultra violet	
<i>Visible</i>	450 nm	} violet } bleu } vert } jaune } orange } rouge	Photographies noir et blanc, couleur
	490 nm		
	580 nm		
	600 nm		
	620 nm		
	700 nm		
<i>Infrarouge</i>	Proche	} Infrarouge noir et blanc	Couleur
	900 nm		
	1 000 nm		
	Moyen réflectif { 1 500 nm		
	Moyen { 2 400 nm		
	3 000 nm		
<i>Micro-ondes ou hyper-frequences</i>	5 500 nm	} → {	Scanneur infrarouge et Thermographie infrarouge
	8 000 nm		
	14 000 nm		
	K { 0,75 cm	} → {	Radar S.I.A.R. Scanneur H.F. Radiomètre H.F.
	X { 2,4 cm		
	C { 3,75 cm		
	S { 7,5 cm		
	L { 15 cm		
	UHF { 30 cm		
	P { 100 cm		
	136 cm		

Figure 72. Le spectre électromagnétique (Girard, 1989)

Bandes	Fenêtres	Rayonnement dominant
Visible	400 à 700 nm	Solaire réfléchi
Proche infrarouge	700 à 1100 nm	Solaire réfléchi
Infrarouge moyen	Vers 3000 et 5000 nm	Terrestre
Infrarouge lointain	8500 et 13000 nm	

Figure 73. Fenêtres de transmission atmosphérique utilisables pour la télédétection passive

1.1.3. Visualisation et principe d’affichage d’une image de la télédétection

Les écrans couleurs d’ordinateur et de télévision émettent trois plans de couleurs : le rouge, le vert et le bleu. Ce sont les couleurs primaires. La qualité de visualisation dépend 1) du nombre de lignes et de colonnes du moniteur et 2) du nombre de couleur affichables simultanément. Les écrans couleurs utilisés en télédétection sont de 256 niveaux pour chaque couleur où chaque pixel est codé par une valeur de 0 à 255. Le codage numérique de l’image est associé aux valeurs radiométriques du capteur d’origine.

L’œil humain ne peut pas tout voir et les couleurs constituées des 50 premiers niveaux donnent du noir. Il est capable de distinguer 16 niveaux pour chaque couleur primaire, ce qui donne au total 4096 couleurs différentes sur l’image composée colorée. L’affichage des trois

canaux d'image sur trois plans d'un écran d'ordinateur est une opération importante dans la technique de la photo-interprétation assistée par ordinateur (PIAO). L'affichage d'un seul canal de l'image sur les trois plans d'écran donne une image en niveau de gris (figure 74). En revanche, pour obtenir l'image en couleurs naturelles, on affiche les trois canaux d'image sur les trois plans d'écran correspondants (figure 75).

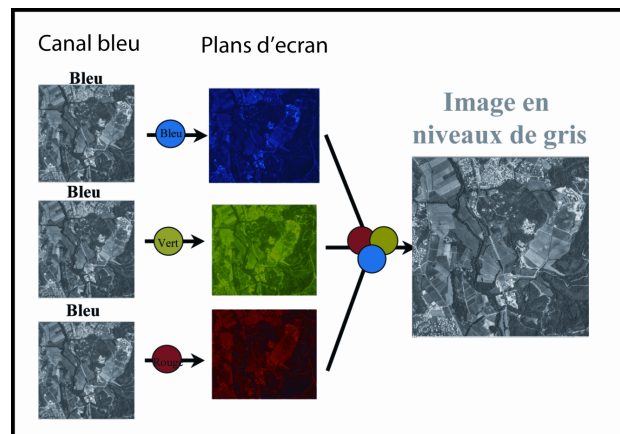


Figure 74. Affichage d'un seul canal (niveaux de gris) (Durrieu, 2009)

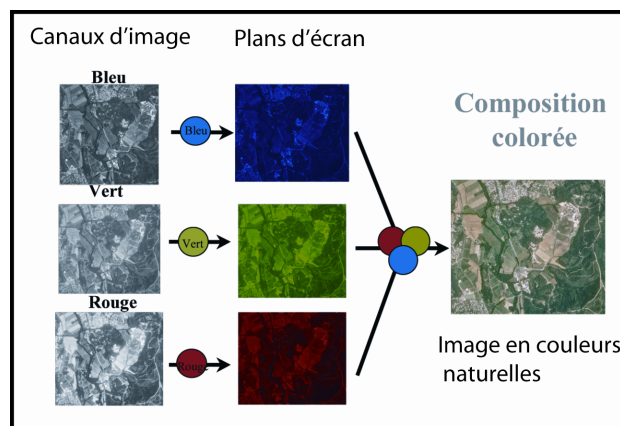


Figure 75. Affichage d'une image en vraies couleurs (Durrieu, 2009)

En télédétection, l'utilisation de l'image en fausses couleurs est courante pour plusieurs applications, notamment pour l'étude de la végétation. Dans une image en fausse couleur, le canal bleu n'est pas affiché. En revanche, un autre canal est utilisé, celui du proche infra-rouge (PIR). On utilise les trois plans d'écran (bleu, vert, rouge) pour afficher les canaux d'image : vert, rouge et PIR (figure 76). Pour une étude diachronique, la bande PIR apparaît pertinente : lorsque l'on affiche les trois plans d'écran à trois dates différentes, cette approche peut permettre de mieux comprendre l'étalement ou la croissance d'une culture : les parties

qui n'ont pas bougé entre les trois dates apparaissent en noir⁵⁹. Le système trichromatique est basé sur le fait qu'une sensation colorée peut être reproduite par un mélange des trois couleurs primaires. La combinaison des couleurs primaires définit les couleurs secondaires (figure 77).

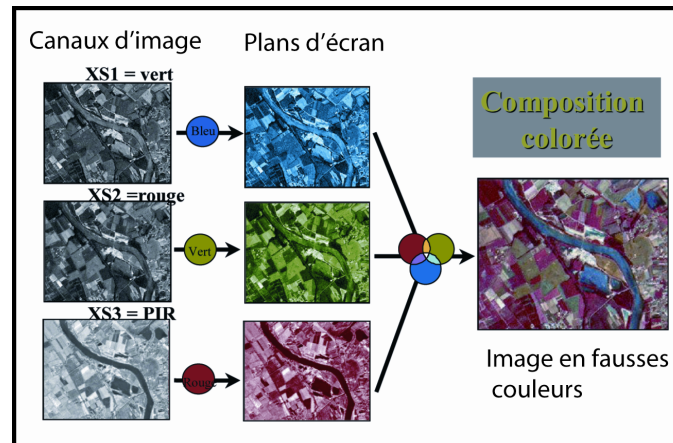


Figure 76. Affichage d'une image en fausses couleurs (Durrieu, 2009)

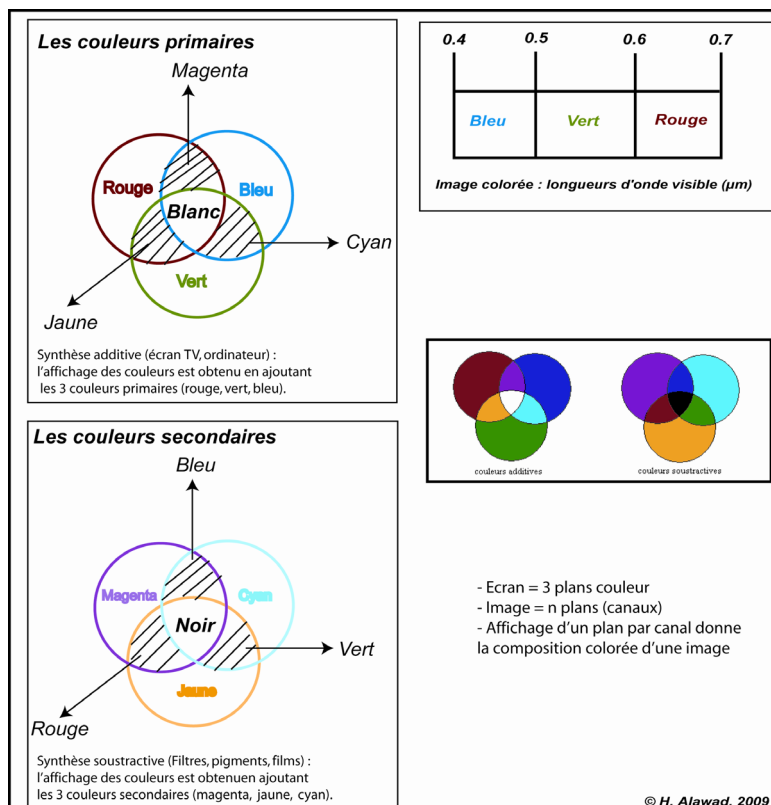


Figure 77. Compositions additive et soustructive des couleurs rouge, vert et bleu

⁵⁹ Pour consulter les trois fichiers *raster* des couleurs primaires à partir du navigateur d'ArcGIS, il faut double-cliquer sur le fichier « image » sélectionné.

⁶¹ Micromètre

Le mélange entre les trois couleurs primaires donne du blanc. Le noir est constitué par l'absence de couleur ou par le mélange entre les trois couleurs secondaires. On peut définir un axe achromatique passant par le noir et le blanc pour chaque canal de couleur (figure 78). Le choix d'une bande de traitement d'image est lié au degré de réflectance des objets étudiés : plus la réflectance est élevée, plus l'objet est clair sur l'image.

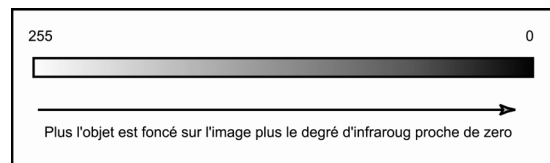


Figure 78. Axe achromatique d'un canal d'image

1.1.4. Réflexion et réflectance : deux notions de référence

Lorsqu'un rayon arrive sur une surface géographique, il est partiellement réfléchi par cette surface (effet d'albédo). Toutes les surfaces réfléchissent une partie du rayonnement et en absorbent une autre partie. Cette réflexion partielle du rayonnement justifie l'utilisation de la télédétection passive dans une certaine gamme du spectre solaire (figure 79).

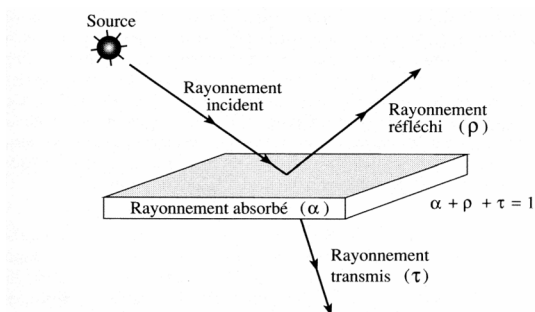


Figure 79. Absorption, réflexion, transmission (Bonn et Rochons, 1999)

En télédétection optique (passive), on a coutume de parler de réflectance pour désigner la proportion d'énergie réfléchie dans une direction donnée, notamment dans la direction du capteur. La variation proportionnelle de réflectance, en fonction de la longueur d'onde, est appelée signature spectrale. Autrement dit, la modification du signal en fonction de la nature d'objet permet son identification à distance. En effet, cette modification engendre l'apparition d'une combinaison originale d'intensités variées à des longueurs d'onde distinctes. C'est la carte d'identité radiométrique de l'objet, appelée signature spectrale, dont la couleur n'est que l'expression dans la partie visible du spectre.

Chaque bande spectrale d'une image présente une table de valeurs attribuée aux pixels de l'image (figure 80). Cette table a des valeurs de réflectance de rayon pour chaque pixel de l'image étudiée (les longueurs d'onde auxquelles l'œil est sensible, domaine du visible).

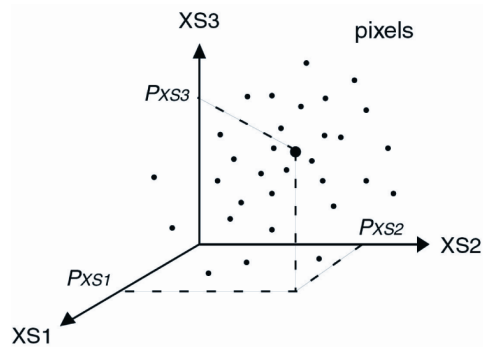


Figure 80. Présentation d'une image dans l'espace des radiométries (IGN, 2005)

La télédétection thermique consiste à mesurer l'énergie radiative émise par la surface terrestre, ce qui permet d'en déduire la température (Jensen, 2000). Ces valeurs absolues sont incluses entre deux degrés de rayon, le degré 0 est la valeur minimum (absence de couleur) et le degré 255, la valeur maximale de l'intensité de la couleur (degré lumineux entre la couleur blanche et noire) (Robin, 1999).

Que signifient ces chiffres ? Le satellite n'a pas un appareil photo à bord, mais un scanner. Ce scanner balaie une zone de la Terre et enregistre la quantité de lumière que la zone renvoie vers l'espace. Il retient cette quantité de lumière sous forme d'un chiffre entre 0 et 255. C'est de cette manière que le scanner peut mesurer pour une zone, par exemple 40, et pour une autre 80. Cela signifie que la quantité de lumière mesurée dans la deuxième zone est deux fois plus importante que dans la première zone. Plus le scanner capte de lumière, plus la valeur est élevée. Cependant, c'est tout ce que le scanner à bord du satellite est capable de faire ! Le satellite envoie toutes ces mesures vers une station de réception sur Terre via un émetteur. Là, les données sont mémorisées sous forme d'un fichier informatique et l'ordinateur convertit les séries de chiffres en image. Pour ce faire, il convertit chaque chiffre en un pixel. L'ordinateur donne une couleur blanche aux pixels ayant des valeurs élevées (environ 255) et une couleur noire aux pixels ayant des valeurs basses (près de 0).

Un pixel ayant une valeur de lumière entre ces deux chiffres reçoit comme couleur une intensité de gris proportionnelle à cette valeur.

La télédétection doit ainsi considérer la source du rayonnement électromagnétique (qui peut être le soleil, l'objet étudié ou le capteur dans le cas d'un radar), l'objet considéré et son voisinage, les éléments perturbateurs (l'atmosphère) et les capteurs. Le spectre électronique visible (rayonnement solaire réfléchi par les surfaces terrestres) est une des bandes les plus utilisées en télédétection (Robin, 1999). La partie visible du spectre va de 0.38 à 0.78 μm ⁶¹. En passant par toutes les couleurs de l'arc-en-ciel, du violet (proche de 0.38 μm) au rouge (environ 0.65 μm), au bleu (0.45 μm) et au vert (0.55 μm). La plupart des satellites d'observation de la terre ont des capteurs enregistrant cette partie du spectre (figure 81).

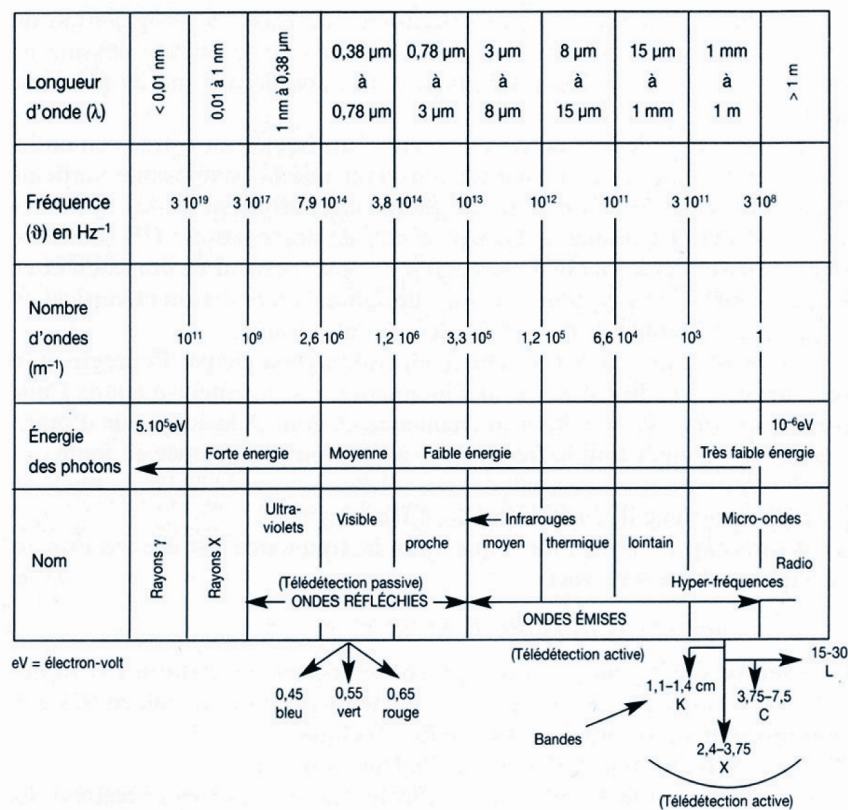


Figure 81. Récapitulatif des ondes du spectre électromagnétique (Robin, 2002)

1.2. La photo-interprétation : vision et contraste

En télédétection, une bonne connaissance des couleurs est nécessaire pour interpréter visuellement les images tirées sur papier et pour interpréter les couleurs à l'écran (PIAO). Cette connaissance permet d'améliorer la lisibilité des résultats pour changer les ordres d'affichage des plans des images, pour choisir un contraste proposé, ou pour améliorer la

qualité des impressions. La PIAO s'intéresse surtout à la question de la vision, aux couleurs et renvoie au processus de capture de la lumière par la rétine de l'œil humain (figure 82).

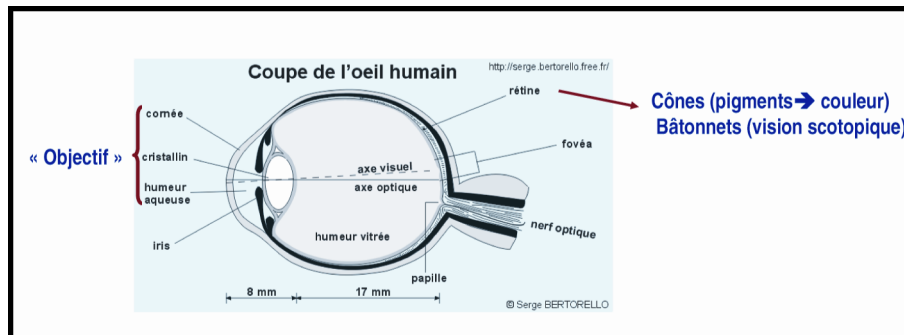


Figure 82. Vision humaine et couleurs (Durrieu, 2009)

Les réactions chimiques transformées en signaux électriques sont transmises par le nerf optique et donnent la perception des couleurs au cerveau. En général, l'œil humain est sensible aux longueurs d'ondes de 400 à 700 nm (la partie visible du spectre électromagnétique) avec un maximum vers 550 nm (vert-jaune). La sensibilité des capteurs de l'œil humain varie selon les longueurs d'ondes des radiations lumineuses (l'œil n'est guère sensible au bleu, mais le cerveau effectue la correction nécessaire).

1.2.1. L'interprétation visuelle de l'image: l'importance de couleurs

La photo-interprétation est déterminée par le choix des données et la définition de classes thématiques. Pour une problématique donnée, il faut rechercher la bonne résolution, qui n'est pas nécessairement la plus fine. Les objectifs de travail sont aussi infléchis par la perception des objets et se définissent selon trois approches possibles : la détection de l'objet, dans le cas où le pixel est plus grand que l'objet ; l'identification de l'objet, dans le cas où le pixel est de même taille que l'objet ; l'analyse de l'objet, dans le cas où le pixel est plus petit que l'objet (figure 83). Les classes thématiques sont aussi définies en fonction de l'échelle à laquelle on souhaite travailler. Une classification thématique générale découpe l'espace en 3, 4... ou 10 types d'occupation du sol. Ensuite une seconde classification décompose chaque type de sol en plusieurs sous-types. Un troisième niveau de classification peut enfin être établi à partir des caractéristiques des objets (figure 84).

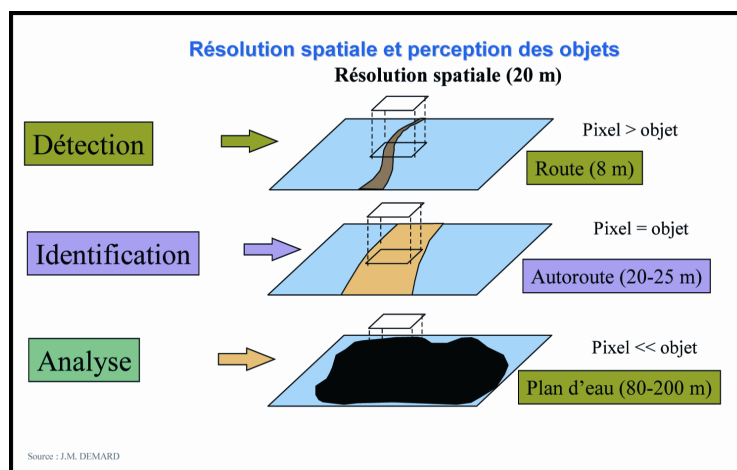


Figure 83. Perception des objets selon leur résolution spatiale (Labbé, 2010)

Thème spatial	Niveau d'analyse 1	Niveau d'analyse 2
Réseaux routiers	- Routes principales - Routes secondaires	- Le nombre - La dimension - La forme - La répartition spatiale (horizontale et verticale)
Réseaux hydrographiques	- Fleuves - Rivières	- Le nombre - La dimension - La forme - La répartition spatiale (horizontale et verticale)
Végétation	- Forêts - Champs de culture	- Le nombre - La dimension - La forme - La répartition spatiale (horizontale et verticale)
Constructions, bâti	- Habitat - Bâtiments industriels - Abri	- Le nombre - La dimension - La forme - La répartition spatiale (horizontale et verticale)
Autre type de sol		

Figure 84. Echelle de précision des données

1.2.2. Traitement d'image et amélioration de l'interprétation visuelle de l'image

Le traitement d'images est « *l'ensemble des techniques et des procédures permettant de manipuler ou d'extraire des informations d'images existantes dans le but d'engendrer des nouvelles images ou d'obtenir des évaluations sous forme de mesures numériques* » (Le grand dictionnaire terminologique, 2004). Autrement dit, le traitement d'image est la préparation d'une image à son analyse par différentes méthodes pratiquées en télédétection. Le contraste, la technique de rehaussement et les filtrages font partie de ces traitements. Le contraste est la différence de ton entre les régions claires et sombres de l'image ; le contraste spatial est lié à la perception des objets dans leur environnement, où un même gris apparaît moins clair s'il est entouré de blanc ; il en est de même pour les couleurs (figure 85).



Figure 85. Le contraste, une différence de ton relative à l'environnement de l'objet observé

Le rehaussement des contrastes est utilisé en télédétection pour améliorer le contraste d'image en redistribuant ses valeurs tout en la préparant à être interprétée visuellement. Cette technique peut être appliquée sur l'image et son histogramme. L'amélioration de la lisibilité de l'image (par le contraste) est utile puisque l'œil humain distingue mieux les éléments très contrastés. Plus on arrive à distinguer les éléments de l'image, plus on a la possibilité de les isoler et par conséquent de les extraire. Contrairement à l'œil humain, l'ordinateur peut faire la différence entre deux valeurs numériques, même si elles sont très proches. Cette approche peut être appliquée sur l'image entière ou sur une partie de l'image. Pour l'étude d'un élément spécifique, ce type d'application s'appelle le rehaussement des contrastes « *à la pièce* »⁶³. Dans ce cas, les valeurs des pixels dans la zone choisie de l'image sont étalées sur la plage de niveaux de gris disponibles (0 - 255). Le reste des valeurs d'image supérieures ou inférieures

⁶³ http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/glossary/index_f.php (Centre canadien de télédétection)

dans l'intervalle seront affichés en noir ou en blanc. L'utilisation de cette méthode dépend bien évidemment des objectifs de travail : plus la cible est visible sur l'image, moins cette technique sera utile. La figure suivante montre un exemple des plusieurs images contrastées à partir d'une image *Google Earth* pour la ville syrienne de *Raqqa* (figure 86).

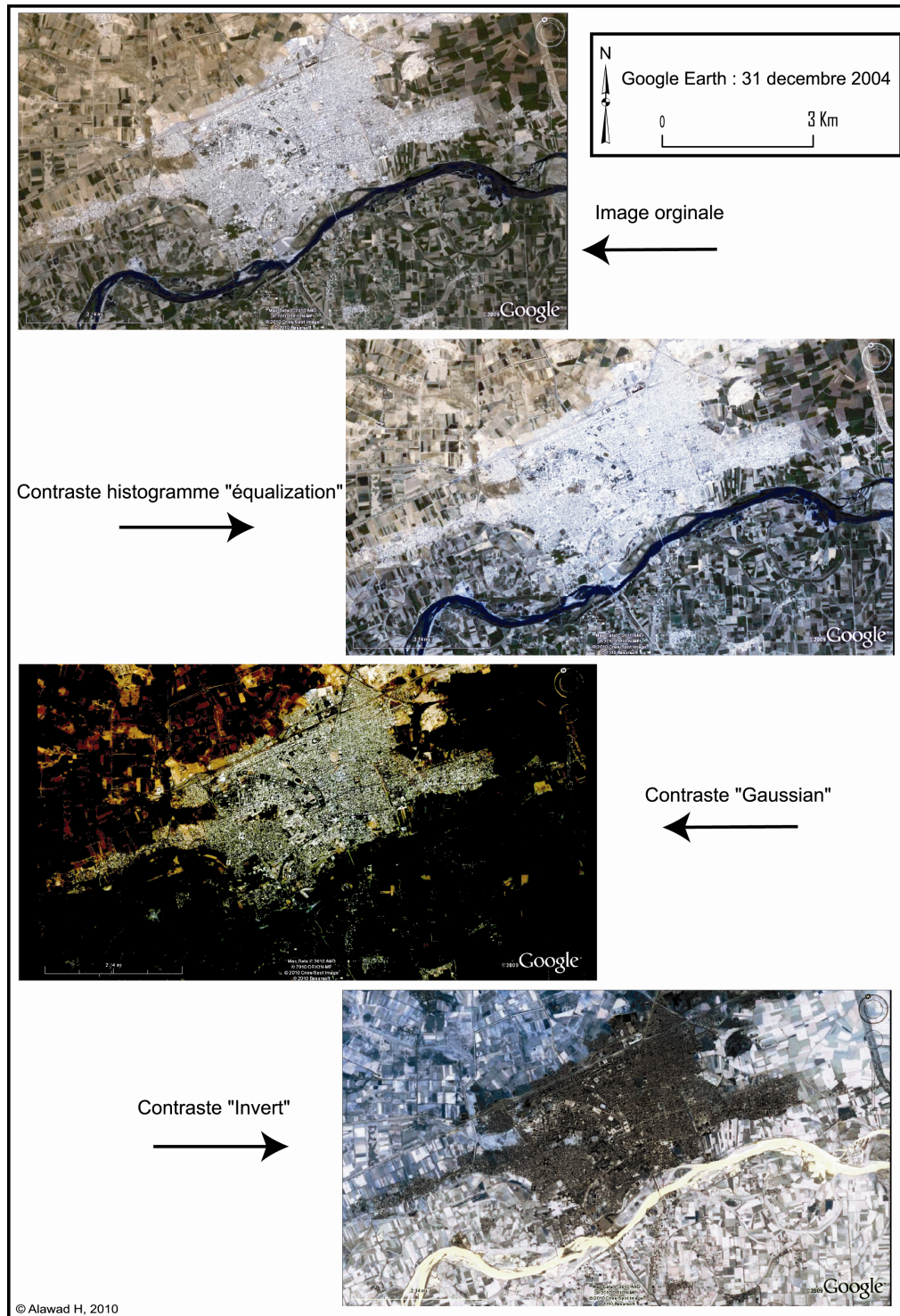


Figure 86. Trois types de contraste dans une image *GoogleEarth* de la ville de Raqqa (Syrie) en 2010

1.2.3. Texture et structure des images : une double approche pour l'interprétation

La texture d'une image est la répétition d'un motif dans différentes directions de l'espace alors que la structure est la forme et l'organisation des objets de la scène (figure 87).

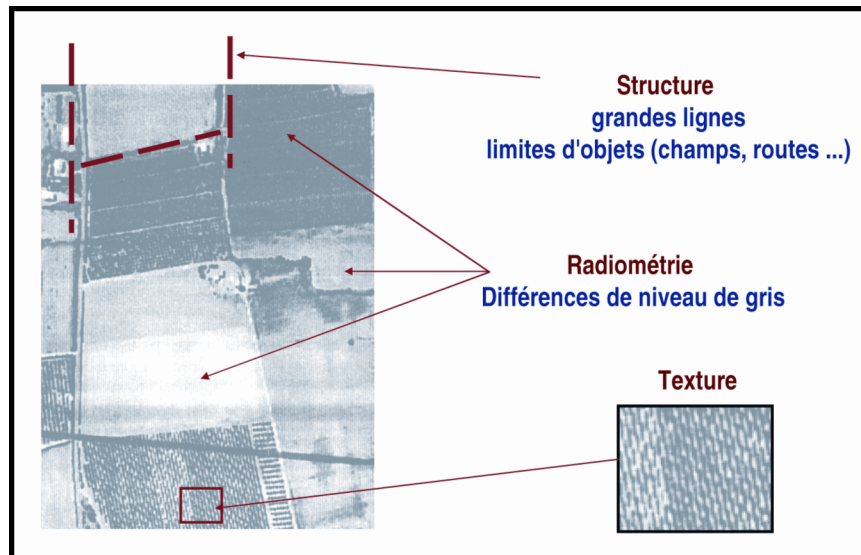


Figure 87. Texture et structure (Durrieu, 2009)

L'échelle d'interprétation de l'image est définie par le type d'approche. L'approche par la structure est souhaitable dans le traitement à petite échelle : elle permet de faire des généralisations par classes d'objets et donc par thème. En revanche, l'approche par la texture est plutôt appropriée pour des traitements à grande échelle puisqu'elle permet de donner des informations plus spécifiques sur des thèmes particuliers.

1.2.4. Intérêts et limites de la Photo-Interprétation Assistée par Ordinateur (PIAO)

Cette technique est efficace pour améliorer la vision de l'image et pour l'interpréter en choisissant une approche de l'analyse des couleurs (texture ou structure). Elle est peu sensible aux variations radiométriques « parasites ». Son utilisation se fait selon deux modalités : soit par un approche manuelle (photographie papier), soit par un traitement numérique (image numérique) assisté par ordinateur à l'aide des SIG.

En général, l'approche manuelle est pertinente à l'échelle du paysage et un peu moins à l'échelle des objets (approche structurelle). On revient ici à la question de la sensibilité de l'œil humain, par comparaison à l'ordinateur qui est capable d'interpréter tous les pixels, mais

aussi de permettre l'édition de cartes ou d'effectuer un grand nombre de calculs. La qualité de l'interprétation de l'image dépend beaucoup de la compétence du photo-interprète.

La photo-interprétation présente néanmoins plusieurs inconvénients : elle est coûteuse, fastidieuse, et pour être efficace, elle doit être menée par des interprètes expérimentés. Depuis quelques années, il est toutefois possible d'utiliser le potentiel des ordinateurs pour l'effectuer de manière quasiment automatique (figure 88).

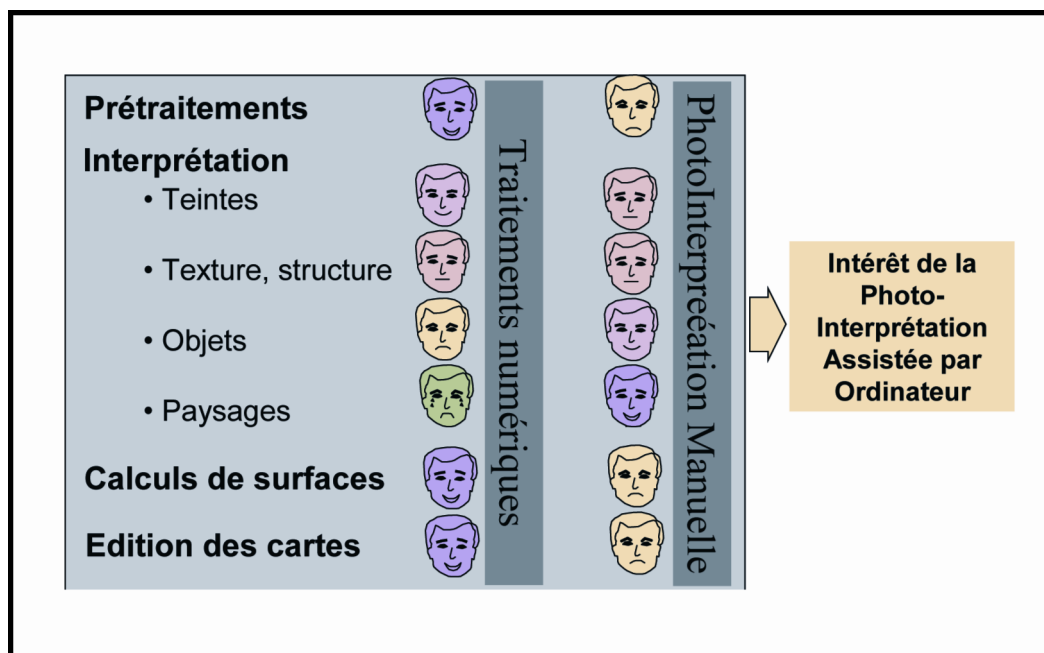


Figure 88. Intérêts et limites de la PIAO (Durrieu, 2009)

1.3. Les effets perturbateurs se manifestant sur l'image brute

Les images acquises par les systèmes d'observation de la Terre ne peuvent être directement superposées à des cartes parce qu'elles subissent des déformations géométriques. Celles-ci sont dues à des erreurs de positionnement du satellite sur son orbite, du fait que la Terre tourne sur son axe pendant l'enregistrement de l'image, aux effets du relief terrestre etc. Elles sont encore amplifiées par le fait que certains satellites prennent des images en oblique.

Le système d'observation de la terre serait ainsi équipé d'un spectre radiométrique parfait, mesurant d'une façon précise et uniforme la quantité d'énergie réfléchie par les cibles de la terre. La lumière solaire et la lumière réfléchie par la cible traversent l'atmosphère. Cependant ces traversées n'éclairent pas toutes les cibles sous le même angle et, en conséquence, le signal est perturbé.

1.3.1. Les effets de brouillage de l'image

La signature spectrale d'un thème spatial dépend de sa réflectance. Pour chaque objet observé dans le spectre électromagnétique à la surface de la Terre, une valeur de réflectance correspond à l'intensité du rayonnement réfléchi par rapport au rayonnement incident. Cette intensité est variable selon la nature de la cible et son degré de sensibilité aux rayonnements incidents. La quantité d'énergie absorbée par la cible et l'énergie réfléchie vers l'espace donnent la signature spectrale de cet objet sur l'image et toutes les cibles de même nature donnent la même ressemblance spectrale.

Les matériaux de construction de l'objet jouent un rôle important dans l'identification d'une signature spectrale, pour des bâtiments par exemple, ce qui peut poser des problèmes d'interprétation de l'image. La figure suivante montre un cas où les signatures des bâtiments ressemblent aux signatures des terrains situés à proximité (figure 89). Cette ressemblance spectrale conduit évidemment à des erreurs lors de l'extraction. La cible ne se distingue par du terrain, ce qui entraîne un travail d'identification long, fastidieux et comportant toujours des risques d'erreurs à moins de vérifications systématiques sur le terrain. L'image montre le cas des bâtiments construits avec un matériau local, le sable du désert.

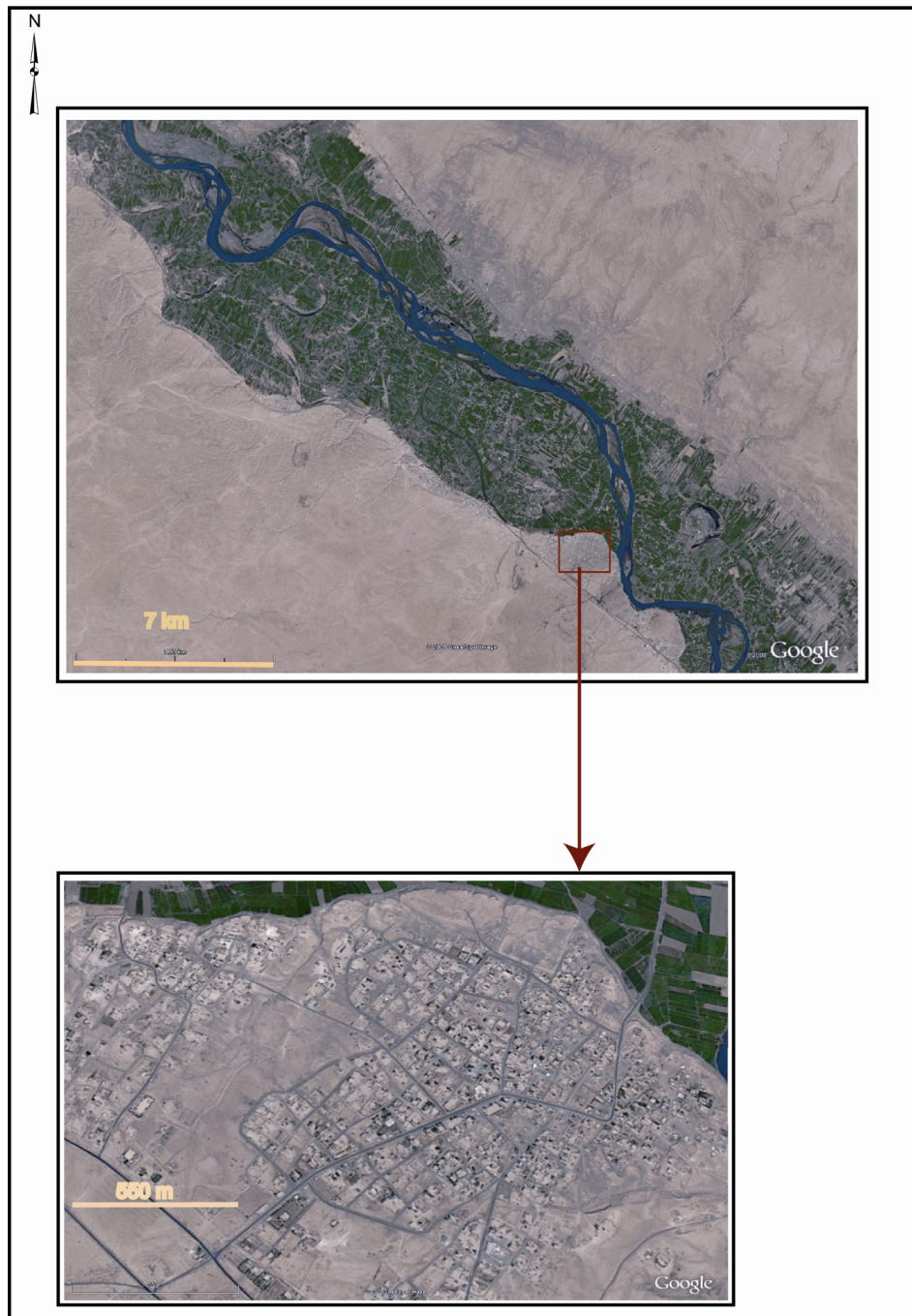


Figure 89. Exemple de construction de bâtiments avec des matériaux locaux : la ville de Dier-el-Zor (Syrie)

1.3.2. Effet de masque et influence du contexte environnemental

Le contexte environnemental des objets peut nuire fortement à la qualité des images. L'ombre générée par les nuages diminue cette qualité en masquant des zones importantes. Plus généralement sur les images, l'ombre n'est pas seulement liée à la présence de nuages

(même si ce cas est le plus fréquent) mais aussi à des reliefs ou encore à la présence d'objets hauts (bâtiments, arbres, etc.) (figure 90).

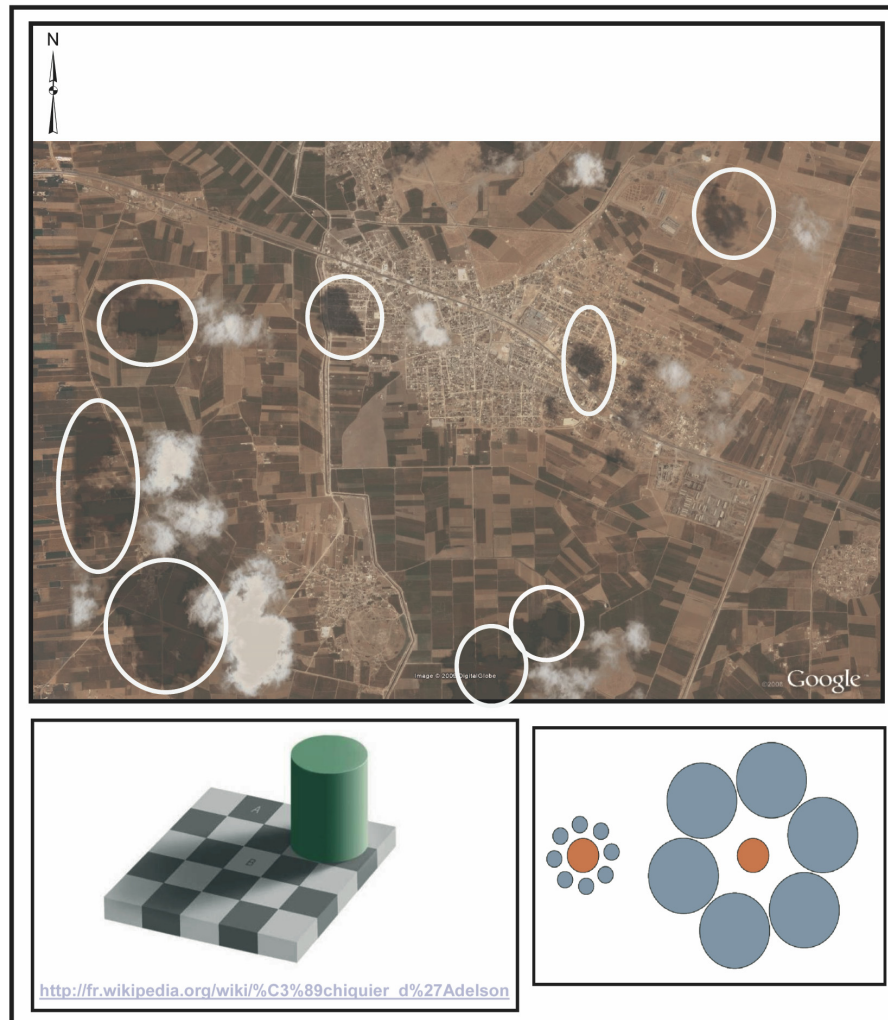


Figure 90. Effet du contexte environnemental sur la qualité des images

1.3.3. La résolution et son effet sur l'image

L'importance de l'effet de la résolution est liée à l'objectif d'interprétation de l'image et à l'échelle d'application. Une image à bonne résolution spatiale est une image correspondant à un certain type d'application. Par contre la même image peut être d'une mauvaise résolution par rapport à un autre type d'application. Plus la résolution est adaptée à l'objectif d'interprétation, plus le résultat est satisfaisant. Un autre critère de bonne résolution spatiale est de permettre une interprétation automatique de l'image. Une mauvaise résolution conduit l'utilisateur à faire des améliorations manuelles sur les résultats d'extraction ou à faire

des classes très générales pour minimiser les erreurs (la résolution spatiale influence grandement la qualité d'une classification pixel par pixel)⁶⁴.

En résumé, l'objectif de l'interprétation d'une image détermine l'échelle spatiale de l'image et par conséquent la résolution spatiale souhaitable. Cette résolution est par ailleurs sensible au changement d'échelle (zoom) et influence le volume d'informations à stocker (figure 91-92).

Résolution spatiale	En Mètre	Domaines d'application
Basse résolution	Supérieure à 100 m	Environnement, météo...
Moyenne résolution	De 10 à 100 m	Géologie, agriculture, cartographie...
Haute résolution	De 4 à 10 m	Identification des cultures et l'occupation du sol
Très haute résolution	Inférieure à 3 m	Urbanisme, cartographie, renseignement,...

Figure 91. Variations des résolutions spatiales et domaines d'application



Figure 92. Deux types de résolution spatiale et ombre portée par des bâtiments (Ezab El Basarta, Egypte)

⁶⁴ Robin M. (1999) *La télédétection : des satellites aux systèmes d'information géographiques*. Paris, p. 219.

1.3.4. Les perturbations atmosphériques et leurs corrections géométriques

La correction géométrique d'une image est la correction des effets atmosphériques qui perturbent le signal d'origine. Les perturbations atmosphériques du signal sont à deux niveaux. Le premier est une perturbation par rapport à la diffusion du rayonnement (25% de diffusion). Cette diffusion est plus forte dans le rayonnement bleu du spectre visible, ce qui explique la couleur bleue du ciel. Le deuxième niveau est l'absorption de l'énergie par les grosses molécules de l'atmosphère (O₃, H₂O, CO₂). L'O₃ absorbe les UV (ultra-violet) et le CO₂, l'IRT (InfraRouge Thermique) (figure 93).

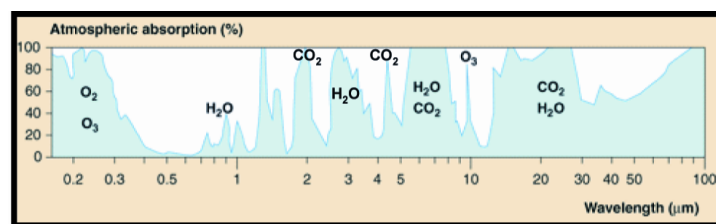


Figure 93. Absorption atmosphérique selon les longueurs d'ondes (Durrieu, 2010)

D'un côté la lumière solaire qui éclaire les objets est perturbée par sa traversée de l'atmosphère et n'éclaire pas tous les objets sous le même angle. D'un autre côté, la lumière réfléchie par les objets doit traverser l'atmosphère avant d'être analysée par le capteur du satellite et cette traversée perturbe également le signal.

Ces perturbations sont dues à la présence de gaz (oxygène, ozone, vapeur d'eau) et d'aérosols (poussières, pollens...) qui peuvent absorber et/ou réfléchir certaines longueurs d'ondes, modifiant ainsi les propriétés spectrales du rayonnement. Il y a aussi des rayonnements qui n'arrivent pas à la cible à cause d'effets atmosphériques. Ces effets sont liés aussi aux longueurs d'ondes. Plus les longueurs d'ondes sont petites, plus leur diffusion dans l'espace est importante. Dans le spectre visible, le bleu est le plus diffusé dans l'atmosphère, suivi ensuite par le vert, puis le rouge.

1.3.5. Les effets de l'angle de prise de vue

La géométrie de la prise de vue peut être une cause de perturbation géométrique sur l'image. L'angle de prise de vue est sensible à trois effets : l'effet panoramique, l'effet de courbure de la terre et un effet lié à la rotation de la terre.

Dans l'effet panoramique, le pas d'échantillonnage envisagé sur la terre augmente avec l'angle de prise de vue. C'est par exemple le cas de *SPOT* entre 2 scènes avec des angles de prise de vue (PV) différents : la longueur de ligne à 60 km en visée verticale peut donner 80 km en visée oblique maximale. En revanche, le satellite *NOAA* (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) prend, à l'intérieur d'une même scène, une image de 1.1 km de côté lorsqu'il se situe au zénith ; celle-ci atteint une taille de 4km si l'image est située sur les bords de la scène (figure 94). La courbure de la Terre crée aussi un effet particulier du fait de la forme ronde de la terre. Cet effet est très marqué dans la prise de vue des images *SPOT* obliques, *NOAA* et *Meteosat*. La rotation de la Terre provoque aussi un décalage pendant la prise de vue de l'image vers l'Ouest des lignes, avec un maximum à l'équateur.

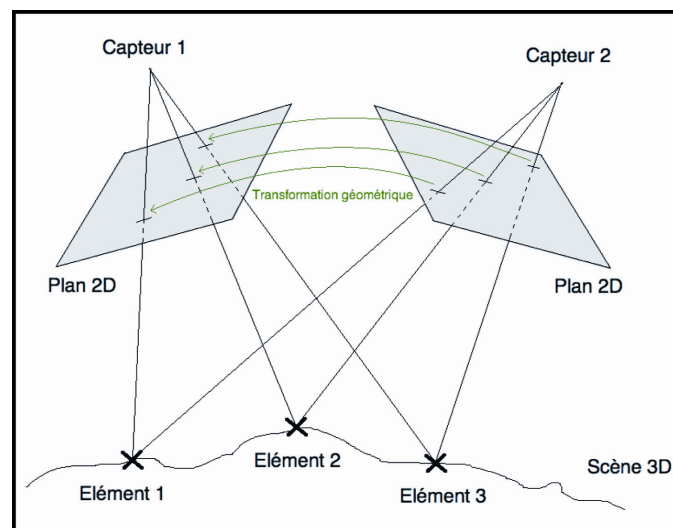


Figure 94. Effets de l'angle de prise de vue (Palman, 2009)

1.3.6. Effets dus au relief

Des déformations imprévisibles sur les images peuvent résulter de paramètres exogènes au système d'acquisition, principalement des effets de relief. En effet, ceux-ci provoquent des déformations parfois importantes et même des incohérences d'une image à l'autre. Ces perturbations géométriques sont liées à la fois au relief et à l'angle de visée. Des déformations systématiques peuvent être corrigées par des traitements préliminaires. La figure suivante montre l'effet de relief et le décalage de position (D) d'un point de relief avec deux angles de vue différents (figure 95).

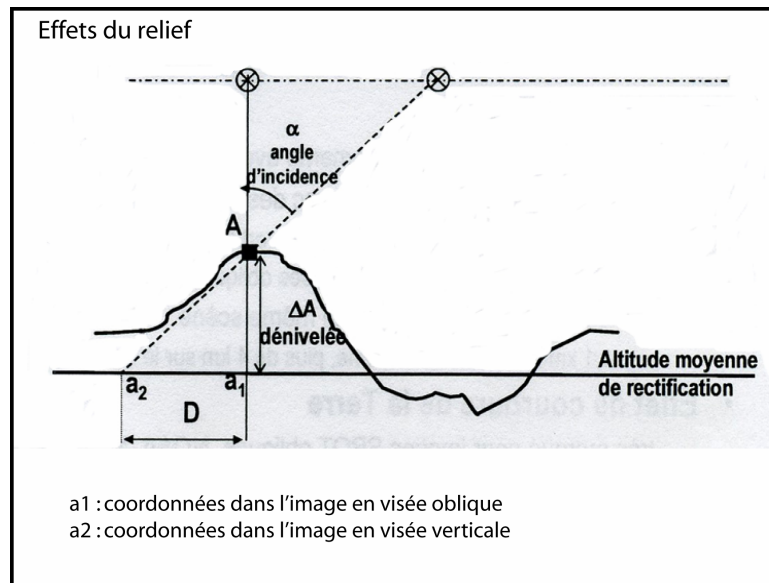


Figure 95. L'effet relief à l'origine de perturbations géométriques (Labbé, 2010)

Par exemple, pour un dénivelé de 200m et un angle d'incidence de 20° , le décalage est de 37 m, soit environ 7 pixels SPOT en mode multi-spectral. Ce problème de décalage montre la nécessité évidente de recourir à des techniques de recalage. L'objectif du recalage est de trouver une transformation géométrique, issue d'un modèle particulier, qui permet de placer sur un même point du plan deux projections qui se rapportent aux mêmes éléments de la scène pour placer et ajuster l'image brute.

1.4. *Structure et caractéristiques de l'information dans l'image numérique*

1.4.1. La structure de l'image

L'image numérique est structurée par plusieurs éléments : la structure matricielle de l'image, le compte numérique, les bandes spectrales (qui donne la richesse spectrale de l'image), les formats d'image, les plates-formes de capture et la nature de la photographie numérique (type de fichier bitmap).

La structure matricielle d'une image numérique est basée sur un principe de décodage. Chaque pixel de l'image présente une valeur radiométrique qui sera traduite sur l'image par une valeur optique entre 0 et 255. Les valeurs radiométriques d'un pixel dépendent de ses propriétés optiques. Ces valeurs optiques forment le compte numérique de l'image et ont un codage lumineux, en couleur pour les valeurs radiométriques d'origine (figure 96).

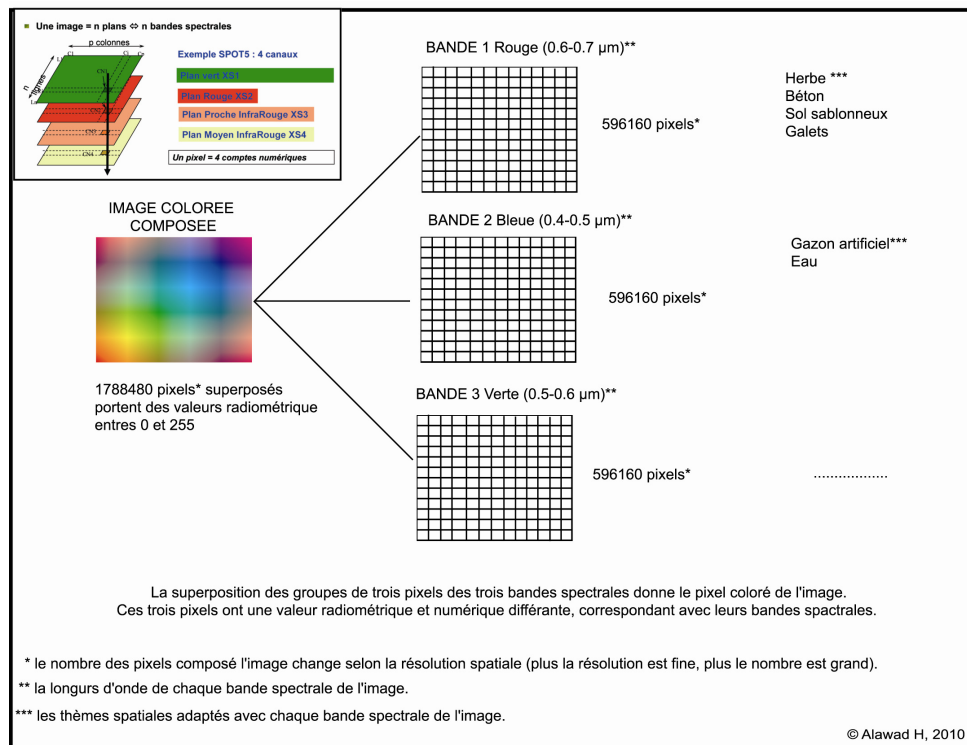


Figure 96. Structure générale d'une image numérique

1.4.2. Caractéristiques des informations radiométriques dans une image numérique

Les informations sur l'image sont caractérisées par le contenu des pixels. Un pixel représente une surface variable du sol ; elle dépend de la géométrie du capteur (figure 97).

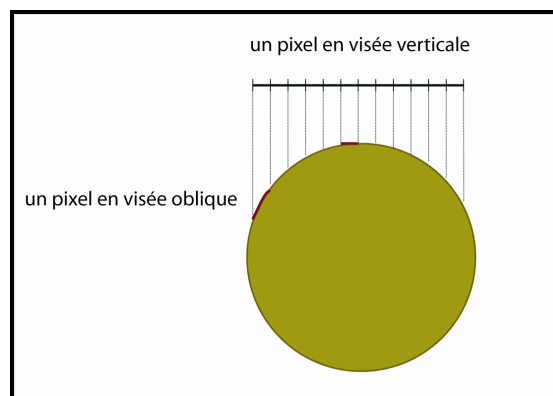


Figure 97. Géométrie d'une image brute (Durrieu, 2010)

L'information radiométrique d'une image brute varie avec le capteur, les conditions d'éclairement, les conditions atmosphériques et le relief. La visée verticale couvre une surface moins large que la visée optique, ce qui change la résolution d'image (figure 97).

1.4.3. Les sources d'image : les plates-formes

La plate-forme ou vecteur est un véhicule sur lequel sont embarqués les capteurs qui recueillent de l'énergie radiative provenant de la scène visée et délivrent un signal électrique correspondant mesurable. Les plates-formes sont classées en fonction de l'altitude à laquelle elles évoluent (figure 98). Les plates-formes satellitaires sont variables selon l'interface avec le lanceur, la génération, le stockage de l'énergie, le contrôle de l'altitude du satellite et de son orbite et leurs liaisons avec le sol. La transmission des données recueillies dans une station par le satellite est directe si une station de réception est visible et programmée. Sinon elle se fait via un satellite de communication ou en différé après stockage (figure 99).

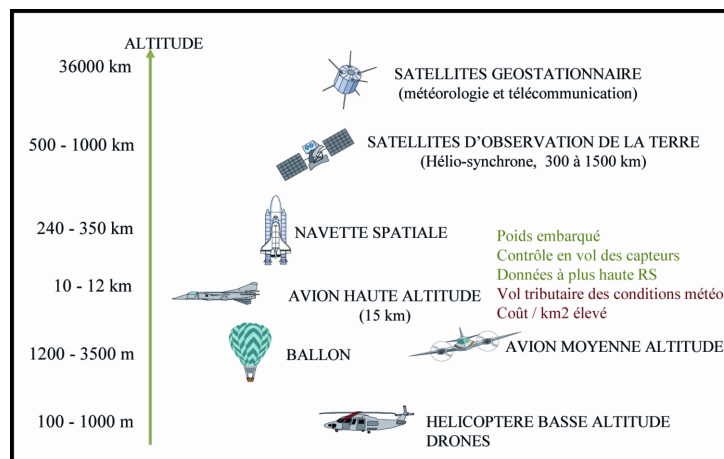


Figure 98. Plates-formes d'images (Begué, 2010))

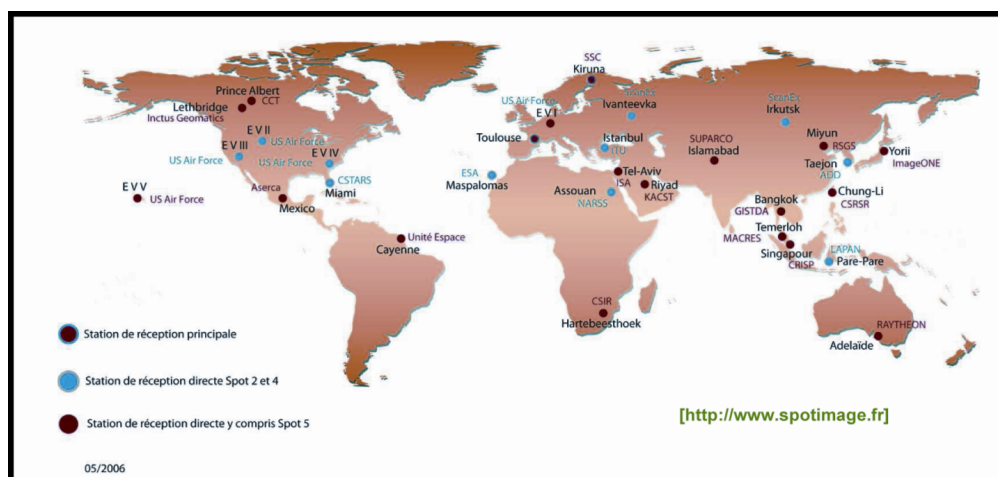


Figure 99. Stations de réception (Spot, 2006)

1.4.3.1. Les satellites

1.4.3.1.1. Les caractéristiques d'un satellite : l'orbite et sa fauchée⁶⁵

La trajectoire effectuée par un satellite autour de la Terre est appelée orbite. L'orbite d'un satellite est choisie en fonction de la capacité des capteurs qu'il transporte et des objectifs de sa mission. Le choix d'une orbite est déterminé par l'altitude (la hauteur du satellite au-dessus de la surface de la Terre), l'orientation et la rotation du satellite par rapport à la Terre. Certains satellites ont une altitude très élevée et regardent toujours la même région de la surface de la Terre. Ils ont une orbite géostationnaire dans le plan équatorial de la Terre (figure 100). Ces satellites angulaires ont une altitude d'environ 36 000 kilomètres et se déplacent à une vitesse qui correspond à celle de la Terre, donnant ainsi l'impression qu'ils sont stationnaires. Cette configuration orbitale permet au satellite d'observer et d'amasser continuellement de l'information sur une région spécifique. Les satellites de communication et d'observation des conditions météorologiques sont situés sur de telles orbites. L'altitude élevée de certains satellites météorologiques leur permet d'observer les nuages et les conditions qui couvrent un hémisphère complet de la Terre.

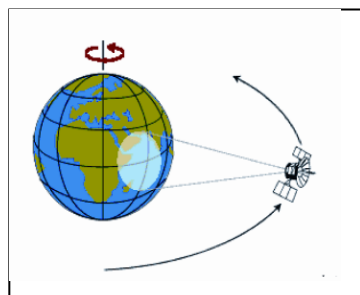


Figure 100. Orbite géostationnaire

D'autres plates-formes spatiales suivent une orbite légèrement inclinée par rapport à l'axe des pôles. Cette configuration, combinée à la rotation de la Terre (Ouest-Est), fait qu'au cours d'une certaine période, les satellites ont observé la presque totalité de la surface de la Terre. Ce type d'orbite est appelé orbite quasi polaire (figure 101) à cause de l'inclinaison de l'orbite par rapport à une ligne passant par les pôles Nord et Sud de la Terre. La plupart des satellites sur orbite quasi-polaires ont aussi une orbite héliosynchrone ; c'est-à-dire qu'ils

⁶⁵ <http://www.schenectady.k12.ny.us/putman/gis/tutorial/indexf.html>

observent toujours chaque région du globe à la même heure locale solaire. Pour une latitude donnée, la position du Soleil dans le ciel au moment où le satellite survole une certaine région au cours d'une saison donnée sera donc toujours la même. Cette caractéristique orbitale assure des conditions d'illumination solaire similaires, lorsqu'on recueille des données pour une saison particulière sur plusieurs années ou pour une région particulière sur plusieurs jours. Ceci est un facteur important lorsqu'on compare deux images successives ou lorsqu'on produit une mosaïque avec des images adjacentes, puisque les images n'ont pas à être corrigées pour tenir compte de l'illumination solaire.

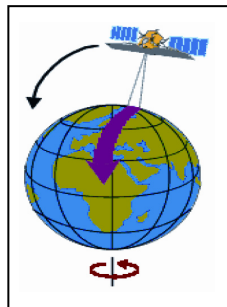


Figure 101. Orbite quasi polaire

De nos jours, la plupart des plates-formes satellitaires sont placées sur orbite quasi-polaire. Elles se déplacent donc vers le nord d'un côté de la Terre et vers le sud dans l'autre moitié de leur orbite. Ces deux types de passage du satellite se nomment respectivement orbite ascendante et orbite descendante (figure 102). Si l'orbite est aussi héliosynchrone, l'orbite ascendante du satellite se fait du côté ombragé de la Terre, tandis que l'orbite descendante se fait du côté éclairé par le Soleil. Les capteurs qui enregistrent l'énergie solaire réfléchi par la Terre ne recueillent donc de l'information qu'au cours de leur orbite descendante, lorsque le Soleil illumine la Terre. Les capteurs actifs qui possèdent leur propre source d'illumination ou les capteurs passifs qui enregistrent l'énergie émise par la planète (l'énergie infrarouge thermique par exemple) peuvent amasser des données autant lors des orbites ascendantes que descendantes de leurs satellites.

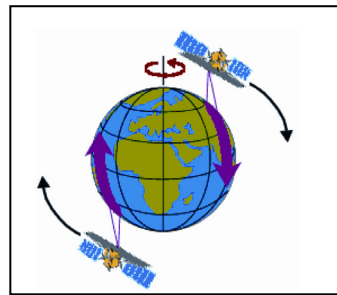


Figure 102. Passe montante et passe descendante

Lorsqu'un satellite est en orbite autour de la Terre, le capteur "observe" une certaine partie de la surface. Cette surface porte le nom de couloir-couvert ou fauchée (figure 103). Les capteurs sur plate-forme spatiale ont une fauchée dont la largeur varie généralement entre une dizaine et plusieurs centaines ou même plusieurs milliers de kilomètres. Pour les satellites à orbite quasi-polaire, le satellite se déplace selon une trajectoire nord-sud.

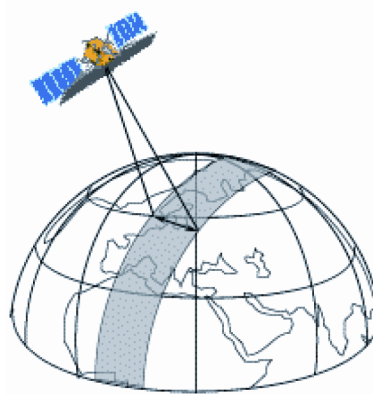


Figure 103. Fauchée d'un satellite

Cependant, vue de la Terre, la trajectoire du satellite semble avoir une tendance à se déplacer vers l'ouest à cause de la rotation de la Terre. Ce mouvement apparent du satellite permet à la fauchée du capteur d'observer une nouvelle région à chacun des passages consécutifs du satellite. L'orbite du satellite et la rotation de la Terre travaillent donc de concert, permettant une couverture complète de la surface de la planète après un cycle orbital complet. Les points sur la surface de la Terre qui se trouvent directement en-dessous de la trajectoire du satellite sont appelés les points *nadir*. Le cycle de passage du satellite correspond à la période de temps nécessaire pour que le satellite revienne au-dessus d'un point nadir pris au hasard. Le satellite aura alors effectué un cycle orbital complet.

La période de temps nécessaire pour compléter un cycle orbital complet varie d'un satellite à l'autre. La durée du cycle orbital ne doit pas être confondue avec la période de revisite. Avec les capteurs orientables, les instruments peuvent observer une surface avant et après les passages de l'orbite au-dessus de la cible, ce qui permet une période de revisite beaucoup plus courte que le cycle orbital. La période de passage au nadir est un facteur important pour plusieurs applications de la télédétection, spécialement lorsque des images fréquentes sont nécessaires (par exemple : pour surveiller la dispersion lors d'un déversement d'hydrocarbures ou pour mesurer l'ampleur d'une inondation). Les satellites à orbite quasi-polaire ont une couverture plus fréquente des régions de latitude élevée par rapport à la couverture des zones équatoriales. Cette plus grande couverture est due à l'élargissement, vers les pôles, de la zone de chevauchement entre deux fauchées adjacentes.

1.4.3.1.2. Les capteurs utilisés

Les capteurs spécialisés dans la réception de longueurs d'ondes réfléchies ou émises par des objets cibles sont tous désignés par le terme de capteurs passifs (figure 104). Le principal inconvénient de ce type de capteur est d'être inopérant si le ciel est sombre ou nuageux. Pour pallier cet inconvénient, un autre type de capteur a été mis au point : les capteurs actifs qui mesurent la quantité réfléchie d'un rayonnement qu'ils ont émis. Le capteur actif le plus couramment employé en télédétection est le radar.

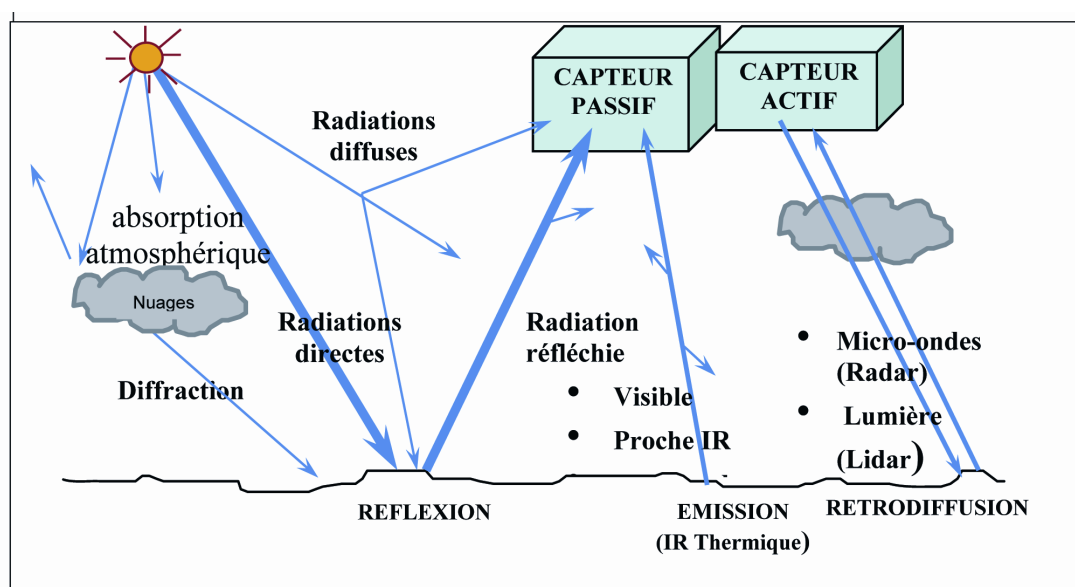


Figure 104. Types de capteurs en télédétection (Office national de la chasse et de la faune sauvage, 2005)

Il existe plusieurs types de satellites d'observation suivant les domaines d'application (météorologie, océanographie,...) et suivant les différents systèmes d'acquisition d'images. Les données fournies par les satellites d'observation varient selon le type de capteurs du satellite qui mesurent les radiations électromagnétiques réfléchies par les corps qui composent la surface terrestre. Pour les ondes électromagnétiques du *visible* et de l'infrarouge proche, les capteurs utilisés sont optiques (émulsions photographiques, détecteurs multi-spectraux et hyper-spectraux), c'est-à-dire qu'ils reçoivent la réflexion de la lumière provenant de la surface terrestre et n'émettent aucun signal. Pour l'*infrarouge thermique*, des détecteurs thermiques sont utilisés. Dans le cas du *radar*, l'instrument émet un signal vers le sol et détecte l'écho de celui-ci, c'est-à-dire qu'il mesure l'onde qui se reflète sur la surface terrestre. La résolution spatiale est la mesure de la plus petite séparation angulaire ou linéaire entre deux objets, habituellement exprimée en radians ou en mètres. En d'autres termes, c'est la superficie de la surface terrestre représentée par un pixel. De façon plus simple, c'est la taille du pixel dans l'image.

Plus la fauchée est petite, plus la résolution est fine (figure 105), la fauchée étant, par définition, est la bande de terrain visée par un système de détection.

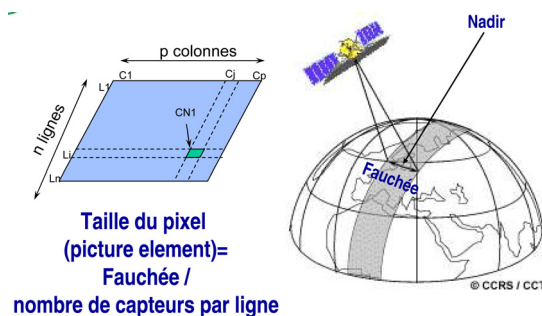


Figure 105. La notion de résolution spatiale (Labbé, 2010)

On distingue les capteurs à haute résolution et ceux à basse résolution. Les satellites en orbite géostationnaire comme *Meteosat* ou *Geos* fournissent des images sur de très grandes zones et à basse résolution et, en général, les satellites en orbite héliosynchrone comme *Landsat* ou *SPOT* fournissent des images à haute résolution sur de plus petites zones. La résolution spatiale varie selon la taille d'image et l'échelle de travail à cause d'un problème de stockage des informations sur l'image. *Ikonos* est un satellite privé qui propose la meilleure résolution d'images satellitaires commerciales avec une précision de 0,65 m sur une taille

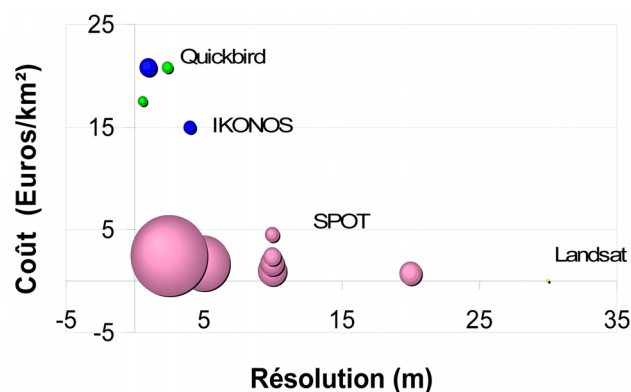
d'image de 5 km. Par contre, *Landsat* donne la meilleure taille d'image avec, par exemple, une taille d'image à 175 km pour une résolution de 30 m. Le tableau suivant donne les échelles maximales de travail pour certaines résolutions spatiales en fonction du type de satellite (figure 106).

Satellite	Meilleure résolution	Echelle maximale
<i>Ikonos</i>	1 m	1 / 2 500
<i>Spot</i>	5 m	1 / 12 500
<i>Landsat</i>	30 m	1 / 100 000

Figure 106. Niveaux de résolution et taille d'images satellitaires

La qualité des données produites (images) et leur prix (figure 107) sont fonction de deux paramètres :

- la *qualité géométrique*, qui dépend des performances du capteur et de la stabilité de l'orbite du satellite,
- la *qualité radiométrique*, qui dépend de la fiabilité des instruments et des détecteurs, des bandes spectrales utilisées, des contrôles effectués (détection et correction d'anomalies).



Coût imagerie satellitaire en PROGRAMMATION, 1a
(la taille des bulles indique la commande minimum en Euros)

Figure 107. Coût des images satellitaires (Bégué, 2010)

La *résolution temporelle* est la répétitivité de l'observation d'un capteur sur un même territoire. La capacité de fournir des images d'une même zone à différentes dates constitue l'un des attraits des satellites d'observation (figure 108).

Satellite	Capteur	Canaux	Taille pixel	Répétitivité	Taille image
NOAA	AVHRR	1 VIS, 1 PIR, 3 IRT	1 km	4 / j	3.000 km
Landsat	TM	3 VIS, 1 PIR, 2 MIR, 1 IRT	30 m 120 m	16 j	180 km
SPOT 1/2/3	HRV P	1 VIS	10 m	26	2 x 60 km
	HRV XS	2 VIS, 1 PIR	20 m	(-> 2,5 j)	2 x 60 km
SPOT 4/5	HRV P	1 VIS	10/5 m	26 j	2 x 60 km
	HRV XS	2 VIS, 1 PIR, 1 MIR	20/10 m	(-> 2,5 j)	2 x 60 km
	Végétation	2 VIS, 1 PIR, 1 MIR	1,1 km	1 j	2.200 km
IRS-1C	PAN	1 VIS	5,8 m	24 j	70 km
	LISS III	2 VIS, 1 PIR, 1 MIR	23,5 m	(-> 5 j)	141km
	WIFS	1 VIS, 1 PIR	188 m		770km
IKONOS	PAN	1 VIS	1m	3j	11km

Figure 108. Caractéristiques de quelques satellites et fréquence de leur passage (Labbé, 2010)

Enfin l'acquisition d'une même scène se fait selon deux modes principaux :

- le mode panchromatique où une seule image est produite à partir de toutes les longueurs d'ondes du spectre visible et souvent d'une partie du proche infrarouge traduite en niveau de gris ;
- ou le mode multi-spectral où plusieurs images sont prises simultanément, chacune dans une région différente du spectre électromagnétique.

1.4.3.1.3. Les différents types de satellite

Cette partie présente brièvement les différents satellites et la télédétection aéroportée. En fin de section, un tableau récapitule les caractéristiques techniques des différents capteurs embarqués sur les satellites et aéronefs (résolution spatiale, bandes spectrales, stéréoscopie, résolution temporelle des satellites).

Voici les principaux satellites commerciaux d'observation de la terre (figure 109).

<i>Nom</i>	<i>Ikonos</i>	<i>Quick Bird</i>	<i>IRS-1C</i>	<i>Rocsat-2</i>	<i>Landsat 7</i>	<i>Spot 1-5</i>
<i>Pays</i>	USA	USA	Inde	Taiwan	USA	France
<i>Nombre</i>	1	2	1	1	1	5
<i>Lancement</i>	1999	2000	1995	2004	1999	1986-2002
<i>Poids</i>	726 kg	953 kg	1 350 kg	764 kg	2 200 kg	2 700 kg
<i>Altitude</i>	681 km	600 km	820 km	850 km	705 km	822 km
<i>Résolution maximale</i>	0.61 m	1 m	5.8 m	2m	15 m	2.5 m
<i>Fauchée</i>	16.5 km	11 km	70 km à 180 km	24 km	185 km	60 km à 120 km
<i>Imagerie</i>	Visible	Visible	Visible	Visible	Visible-thermique	Visible
<i>Durée de vie</i>	5+ ans	4-5 ans	?	5 ans	?	5+ ans

Figure 109. Types de satellite avec leurs caractéristiques (Argenton V. et al. 2004-05)⁶⁶

SPOT-5 a été placé avec succès en orbite par *Ariane 4*, le 4 mai 2002, offrant une résolution de données (2,5 à 5 m) jusqu'à 4 fois plus fine qu'avec les *SPOT 1* à 4. Cette haute résolution combinée avec une grande largeur de bande (60 km x 60 km) en fait une source très utilisée pour des applications comme la cartographie, la surveillance et la planification urbaine. L'instrument HRS (Haute Résolution Stéréoscopique) embarqué sur *SPOT 5* pointe à la fois vers l'avant et vers l'arrière du satellite permettant l'acquisition simultanée des deux images d'un couple stéréoscopique. Ceci constitue un avantage important pour la qualité et la précision des MNT à HRS, le processus automatique de corrélation étant grandement facilité par la parfaite ressemblance radiométrique des deux images.

1.4.3.2. Les images aériennes

Les sociétés spécialisées dans ce domaine de la cartographie numérique aérienne sont équipées d'avions permettant d'effectuer des prises de vue à haute altitude (6000 mètres). De la même manière que pour l'instrumentation satellite, la caméra peut prendre à l'avant de l'avion avec un angle de $+19^\circ$ et à l'arrière avec un angle de -19° . Cela permet de voir un point au sol selon plusieurs angles différents.

⁶⁶ castel51.free.fr/data/TPE-TS-images-satellites-aeriennes-argenton-pousset-pellissier.pps

Un enregistreur numérique est relié à la caméra permettant d'enregistrer en temps réel l'ensemble des données sources en haute définition (12000 pixels x 4 canaux spectraux + 3 angles de vue) sur des cassettes de capacités de 100 Go. Les photographies sont ensuite retraitées au sol pour une qualité optimale. La qualité des images aériennes est beaucoup plus grande que celles des capteurs spatiaux actuels. La résolution des images aériennes a une précision beaucoup plus fine avec la possibilité d'obtenir des images en 2D ou 3D de résolution allant de quelques centimètres à quelques mètres (possibilité de voir des bâtiments, des véhicules etc.).

1.4.3.2.1. Les capteurs multi-bandes aéroportés

Basée sur le même principe que la télédétection satellitaire mais à bord d'un avion, les capteurs aéroportés sont des capteurs multi bandes qui peuvent avoir de 3 à 230 canaux séparés dans différentes parties du spectre électromagnétique. En plus d'une très grande résolution spectrale, la résolution spatiale de tels capteurs peut être très fine (en-dessous du mètre). Le problème essentiel avec ces données est le manque de fiabilité de la correction géométrique car les données peuvent être affectées par la variation de l'altitude de l'avion ou la dérive le long de la ligne de vol. Le développement des GPS permet d'améliorer ces défauts de géométrie : une précision géométrique de l'ordre de 5 à 25 mètres peut ainsi être obtenue mais les opérations de correction sont fastidieuses.

Des applications utilisant les données de capteurs multi spectraux aéroportés ont ainsi pu être réalisées au Canada (Lee et Lunetta, 1995) : classification de la végétation, cartographie de l'occupation ou de l'utilisation du sol, suivi de la qualité de l'eau, cartographie des zones humides, mise à jour des cartes. Le Centre Saint-Laurent (Québec) a utilisé des données acquises à partir de données d'un capteur multi-spectral aéroporté, le MEIS II, pour cartographier les différentes classes d'occupation du sol sur le premier kilomètre de rive du Saint-Laurent incluant les eaux du fleuve. Les résultats ont ainsi permis de distinguer 74 classes d'occupation du sol, parmi lesquelles se trouvent 55 classes de milieux humides. Virnstein et Tepera (1997) ont également utilisé avec succès les données collectées par le spectro-imageur CASI (*Compact Airborne Spectrographic Imager*) sur 20 bandes spectrales avec une taille de pixel de 2,50 m pour le suivi d'herbiers marins en Floride.

Le laboratoire COSTEL de l'Université de Rennes a aussi mis en place des recherches visant à tester l'apport d'un capteur aéroporté de type CASI pour le suivi des zones humides de bas-fonds (Pivette, 1999) après avoir conclu à la difficulté de suivi de ces milieux par les outils de la télédétection classique (*SPOT* et *LANDSAT*).

Les résultats ont permis de préciser les potentialités et les limites des capteurs aéroportés pour l'étude des zones humides de petite superficie. Les travaux réalisés en mars 1999 ont montré l'intérêt des données hyper-spectrales acquises à 2 m de résolution pour discriminer les différents modes de gestion des prairies. L'analyse d'indices de végétation (TVI) sur plusieurs parcelles mettait alors en évidence des réponses spectrales bien différenciées pour les prairies pâturées et fauchées.

L'utilisation de données issues de capteurs multi-spectraux pour l'étude de zones humides se développe mais reste rare car soumise à la possibilité de disposer d'un tel capteur et de programmer un survol du site d'étude. S'il est vrai que de telles données possèdent de grandes précisions spatiales et richesses spectrales, leur géoréférencement n'est pas sans poser problème, surtout sur des zones humides de grande superficie. Aussi ces données constituent un excellent outil pour le suivi de petites zones humides.

Conclusion

Les éléments développés au cours de ce chapitre soulignent la sensibilité de l'image numérique. Entre la capture de l'image et l'extraction de son contenu, de nombreux effets peuvent intervenir pour modifier son apparence. Ces effets font de chaque image un cas particulier, dépendant du moment de sa fabrication mais aussi d'autres critères tels que le mode de capture de l'image, la qualité de l'enregistrement, les saisons, ou encore l'heure et l'angle de la prise... Tous ces éléments peuvent modifier la vision et la structure de l'image et, par conséquent, son contraste. Un document ayant de bonnes qualités (visuelle et spectrale) permet des traitements plus fiables. Evaluer la bonne qualité d'une image, c'est connaître et évaluer tous les paramètres intervenant dans le processus de fabrication de cette image. Leur connaissance est indispensable en raison des déformations géométriques ou des déformations atmosphériques au sein d'une image donnée.

CHAPITRE 2

**L'analyse d'images issues de *Google Earth* :
évaluation et pertinence pour la détection de l'étalement urbain**

Introduction

Ce deuxième chapitre décrit les caractéristiques et les modes de fabrication des données images de *Google Earth* tout en lisant l'ensemble des paramètres à prendre en compte dans une procédure d'extraction d'objets géographiques. Une qualité suffisante est indispensable pour lancer la procédure d'extraction quelle que soit l'échelle spatiale de l'observation. De ce point de vue, il est important d'étudier les images fournies par l'interface *Google Earth*. Des paramètres permettent d'isoler la cible sur l'image pour bien comprendre la forme de sa répartition dans l'espace étudié. Une bonne connaissance de cet objet, de sa nature physique et même de son influence sur l'image, sont autant d'éléments essentiels pour apprécier la bonne qualité des résultats de l'extraction.

2.1. *Visualisation et exploitation de nouvelles sources d'information géographique*

L'utilisateur définit les signatures spectrales qu'il souhaite extraire, à partir de l'image ; ensuite, il délimite des zones caractéristiques de ces objets. L'extraction des valeurs du compte numérique de l'image peut exprimer la signature spectrale de la cible. Enfin, la catégorie des classificateurs flous plus récente, suscite l'intérêt des chercheurs, car elle permet d'introduire une information texturale et des mesures discriminantes (Pesaresi et Bianchin, 2001). Quand les données requises ne concernent que des éléments visibles tels la localisation de villes, le tracé d'infrastructures ou encore des limites, cartes et photographies peuvent être utilisées indistinctement. Une carte de situation sera toutefois plus simple à traiter qu'une photographie, qui exige une phase préliminaire d'extraction des objets (Voiron, 1995).

Par contre, la connaissance du terrain et l'expérience technique des utilisateurs jouent un rôle primordial, soit au niveau des étiquettes thématiques des classes spectrales (la nomenclature), soit au niveau de la maîtrise d'ArcGIS ou d'un autre logiciel de même nature. Le meilleur résultat obtenu par cette approche est de parvenir à construire une base de données vectorielle à l'échelle fine de chaque élément de bâti. Cette méthode ne donne pas d'informations spécifiques sur ces données, par exemple la hauteur de bâti, le type des bâtiments, etc.

L'information spectrale peut être quantifiée et utilisée sous forme d'indices, mais elle est surtout la base principale de l'analyse des formes d'occupation du sol à partir d'une classification de l'information spectrale. Il s'agit là d'une forme intéressante de mise en valeur de l'information sur l'image : grâce à une classification de l'image, on crée en effet une information géographique qualitative et spatiale discrète (Donnay et Unwin, 2001). Ces méthodes de classification ont également l'intérêt de proposer un produit fini où chaque type d'occupation du sol est clairement défini.

Le compte numérique est inclus dans l'image extraite et est exporté dans le fichier vectorisé de l'image. On peut également ajouter des informations supplémentaires par rapport à l'objet étudié dans ce fichier après avoir effectué une opération de « fusion » des pixels vectorisés. La qualité d'extraction dépend du niveau d'automatisation de la méthode. Plus l'extraction est automatique et la signature spectrale facile à déterminer, plus le résultat est satisfaisant. La facilité à identifier la signature spectrale de l'objet dépend de sa visibilité sur l'image et de son homogénéité spatiale.

2.2. *Modes de représentation des données spatiales en géographie*

Traitant du renouveau cartographique issu de l'usage des SIG, Rimbart montre que le cartographe doit désormais considérer l'espace géographique comme la rencontre de plans d'informations numériques (Rimbart, 1995, p. 121). Or cette rencontre n'est possible que grâce à une base de localisation identique. Celle-ci ne pose pas de problème pour les informations cartographiques classiques, mais elle est inexistante dans le cas des images satellitaires et aériennes.

De plus, ces images sont caractérisées par une géométrie implicite (Caloz et Collet, 2001). Elles sont liées aux conditions d'enregistrement. Toute méthode se basant sur les images de télédétection débute par conséquent par une mise aux normes cartographiques des images et un géoréférencement.

« Les logiciels de SIG permettent d'interroger les données à la fois à partir de la localisation des objets et à partir de leurs caractéristiques, et d'afficher le résultat sous forme cartographique » (Desbois, 2008).

Les objets géographiques se manifestent par une forme, c'est-à-dire un contenu et un contenant. La présentation du contenant est du ressort de la géométrie ; celle du contenu est du ressort de l'attribut.

« À chaque point d'un objet vectoriel ou à chaque pixel d'une image raster sont associées des coordonnées géographiques exprimées en latitude et longitude (et éventuellement altitude) » (Desbois, 2008).

Deux grands modes de représentation des données spatiales existent en géographie : le mode « image » (*raster*) et le mode « vecteur » (parfois appelé mode « objet »). Ces deux logiques de représentation répondent à des besoins différents d'organisation des données spatiales.

Le mode « image » est adapté à la présentation de surfaces géographiques continues, mais il est mal adapté à la présentation des objets géographiques individualisés ; par contre, le mode « vecteur » est adapté à la présentation des objets géographiques individualisés, mais il est mal adapté à la présentation surfacique. Le mode « vecteur » est de plus en plus utilisé en télédétection, la représentation d'objets en mode « vecteur » étant plus satisfaisante qu'en mode « *raster* » (Robin, 2002).

2.3. *Les images Google Earth*

Internet fournit actuellement des cartes, des images satellitaires et des photographies aériennes pour la quasi-totalité de la surface terrestre du globe.

« La disponibilité de ces outils, on le sait, permet des repérages sur le terrain et des analyses d'espaces géographiques et de paysages de plus en plus détaillés. Ils sont depuis longtemps les outils du géographe dans l'inventaire des formes et des structures spatiales de la surface du globe. Mais ils servent aussi à bien d'autres sciences, chaque fois qu'elles veulent prendre en compte la dimension spatiale des phénomènes qu'elles observent » (Courtot, 2008).

Google Earth est un de ces outils à télécharger gratuitement par Internet. Il existe en version 2D accessible en ligne via une interface Web (équivalent à *Google Maps*) et en version 3D depuis l'été 2007 pour laquelle il faut installer un logiciel sur le poste de l'utilisateur, ce qui a toutefois l'avantage de permettre une navigation plus fluide sur une connexion haut débit (Thomas, 2008).

Google Earth permet de naviguer sur la terre entière, d'ajouter des « épingles communautaires » etc. *« Dans les terres virtuelles, tout concourt à effacer la différence entre le globe, la représentation cartographique et ses règles de projection, et la représentation photographique « objective » de la réalité » (Desbois, 2008).*

Il est possible aussi de créer des marques-pages pour mémoriser ses recherches à travers l'utilisation de « lieux favoris » dans les navigations géographiques.

En outre, les photos satellitaires de *Google Earth* se différencient par le fait qu'elles offrent une qualité inégale (résolution et couleurs) pour le monde entier. En effet, la résolution n'est pas homogène sur toute la planète et, d'une manière générale, les grandes agglomérations sont beaucoup plus détaillées que les milieux ruraux. *« L'accès gratuit à de tels sites de cartographie numérique démocratise donc l'accès à l'information géographique » (Thomas, 2008).* *Google Earth* utilise des photos satellitaires et aériennes. La résolution des images est limitée entre 1 m et 15 m par pixels ce qui peut être assez précis.

« Les images satellites y ont une résolution moyenne de quinze mètres, certaines pouvant même aller jusqu'à un mètre. Cela signifie que la dimension du plus petit objet que l'on peut distinguer varie de 1 à 15 mètres. Dès lors, on comprend mieux pourquoi l'on peut apercevoir les parasols ouverts dans les jardins ou les voitures arrêtées aux carrefours » (Thomas, 2008).

Cependant, pour les principales agglomérations, *Google Earth* utilise également des photos aériennes, bien plus précises que sur le site interministériel (figure 110).

Critères	Echelle de travail	Accès aux images	Type d'images	Résolution d'images	Traitement avec Arc-GIS	Coordonnées géographiques et l'échelle spatiale	Age d'images	Zoom maximum
Google Earth	Mondiale	Logiciel à télécharger (gratuit)	Satellites ou aériennes	Variables	Oui	Oui	Très récentes avec la possibilité d'accéder les images historiques	3 m

Figure 110. Caractéristiques principales des images de *Google Earth*

La visualisation des images de *Google Earth* se fait par l'utilisation du langage KML (*Keyhole Markup Language*). C'est une grammaire XML qui permet d'afficher et de gérer des données dans *Google Earth*. Le KML peut diffuser des données XHTML riches (textes, images, vidéos), des images plaquées sur la photo satellitaire etc. Ce type de langage offre aussi la possibilité de poser des points, tracer des lignes, des polygones. Il permet de jouer sur les angles de vue, les objets 3D simples, voire texturés. L'une des fonctionnalités les plus importantes pour la recherche reste l'enrichissement en données externes.

Pour la visualisation d'image en 2D, *Google Earth* utilise une projection Mercator/géodésie WGS84. Pour les images en 3D, la visualisation est faite par une projection cylindrique simple. C'est une projection cartographique simple dans laquelle les méridiens et les parallèles sont des lignes droites équidistantes, avec des intersections à angle droit (Pouyllau, 2007). Les images de *Google Earth* sont déjà rectifiées et géoréférencées. Des corrections ont été appliquées sur les images au niveau radiométrique, géométrique et topographique. De plus, les coordonnées géographiques, les sources des images et l'échelle spatiale sont des informations accessibles sur le navigateur de *Google Earth*.

« L'indication par défaut de l'altitude du point de vue en lieu et place de l'échelle, la possibilité de passer à la vue oblique, et même le passage d'un lieu à un autre de l'index par une animation qui évoque une trajectoire balistique, tout désigne la terre virtuelle comme une simulation dans laquelle l'utilisateur est invité à se projeter plutôt que comme un document à consulter » (Desbois, 2009).

En principe, la fauchée est définie comme la « bande de terrain visée par un système de détection » (CCT, 2010). Elle détermine la taille du champ global d'observation, c'est-à-

dire la taille de la scène que le capteur peut « voir » et donc la taille maximum de l'image (Lhomme, 2005). Le principe de fonctionnement de *Google Earth* est de prendre une grande taille d'image de 4096*4096 pixels et de la décomposer ensuite en 64 images de 256*256 pixels à l'aide d'un outil simple appelé *ImageCutter*. Cet outil découpe l'image en tuiles adaptées à un affichage ultérieur sur *Google Earth*. *ImageCutter* est donc une application conçue pour prendre n'importe quelle image ou photo numérique et la découper en tuiles affichables dans une interface comme *Google Earth*. Grâce à cet outil, de grandes images peuvent être publiées sur le web sous un format qui permet à l'utilisateur de faire des panoramiques ou des zooms en utilisant le standard de l'interface *Google Earth*. Au niveau de décomposition le plus ultime, il n'y a ainsi plus qu'une seule image carrée de 256*256 pixels qui correspond à une petite partie de l'image d'origine. A l'échelle suivante, il y a 4 carrés d'images de 256*256 qui correspondant à une image de 512*512 pixels etc. (figure 111).

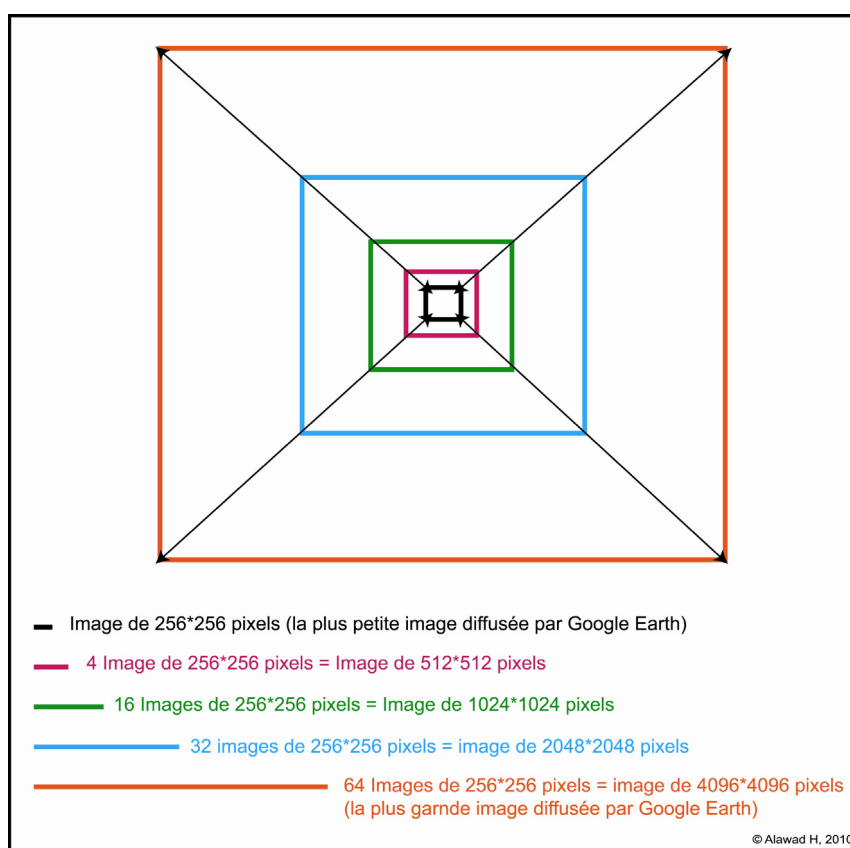


Figure 111. Tailles de scènes d'images *Google Earth* en pixels

La plus grande échelle spatiale avec laquelle on peut travailler sans « pixellisation » (sans pixels d'image visibles) et avec la meilleure résolution d'image *Google Earth* « 1m »

est 1/256 m. Dans le cas où l'image a une résolution spatiale de 1m, 1 pixel équivaut alors à 1m² et la plus petite image correspond à la surface suivante :

$$256 \text{ pixels/mètre} * 256 \text{ pixels/mètre} = 65536 \text{ m}^2$$

C'est la limite qui permet de travailler avec une partie de l'image d'origine sans qu'elle soit « pixellisée ».

Le logiciel *Google Earth* permet d'enregistrer les images en format JPG. Dans ce cas, l'image a besoin d'être géoréférencée avant utilisation dans un SIG (cette étape est expliquée plus précisément dans le chapitre 4). En revanche, *Google Earth* permet aussi d'enregistrer les images dans le format KML qui conserve le calage et le géoréférencement. Plusieurs exemples d'images pris en France et en Syrie indiquent que les clichés de *Google Earth* enregistrent des décalages plus ou moins importants. Ces écarts varient selon les endroits géographiques et sont liés aux plates-formes de capture, aux effets modificateurs des paramètres de prise de vue et surtout au relief (cf. chapitre 1).

A titre d'exemple en Syrie, cet écart est en moyenne de 50 m à Alep, Damas et Dier-el-zor. En France, il est d'environ 25 m et varie aussi selon la nature topographique de la région. En général, plus la présence des reliefs est importante, plus les écarts de décalage le sont aussi. Dans ce contexte, ces images constituent des bases de données *raster* très utiles pour les techniques de photo-interprétation dans les recherches scientifiques (droits d'utilisation réservés à des fins scientifiques et non commerciales) (*Google Earth*, 2010). Elles permettent d'interpréter visuellement et de donner des photos avec des degrés de contraste plus ou moins élevés.

Ces images « ouvertes » constituent une nouvelle source d'images en accès libre et sont prêtes à être analysées par différentes méthodes de traitement et d'analyse d'image en télédétection, avec des objectifs scientifiques.

« Les utilisations scientifiques sont à l'heure actuelle encore limitées. La télédétection, notamment, est une discipline qui a besoin de traitements plus sophistiqués. En géographie, on limite l'usage de Google Earth à des vérifications, des « vérités terrains », des analyses simples de structures urbaines, des illustrations de formes de peuplement » (Thomas, 2008).

2.4. *Détection de changements entre des images Google Earth à deux dates différentes*

Les images de *Google Earth* permettent-elles d'observer des changements intervenus entre 2004 et 2009 ? A travers un exemple, on doit pouvoir détecter les changements d'un phénomène (disparitions et apparitions) sur deux images à des dates assez proches.

Les deux images sont celles de l'agglomération d'Alep, la plus grande ville de Syrie habitée par 450 7000 habitations en 2009 sur une superficie de 220 km² (figure 112).



Figure 112. La ville syrienne d'Alep 2010 (H. Alawad, 2010)

La première image a été captée en 27 juillet 2004, la deuxième en 15 juin 2009, soit un intervalle de 5 ans (figure 113). Il faut savoir que les villes syriennes connaissent une période de réaménagement assez rapide de leur territoire, y compris entre 2004 et 2009. La technique utilisée pour détecter les éventuels changements est de montrer les tendances de l'étalement urbain, si elles existent. Cette opération a été effectuée sous ERDAS Imagin 9.3.

Cette méthode est la plus utilisée dans ce type d'analyse. Elle est simple et son résultat est facile à interpréter. La détection des changements se fait par différence radiométrique, pixel par pixel. Le résultat de l'opération a été suivi de plusieurs filtrages (5 fois), de type « majorité 3*3 ». Ce filtrage aide à éliminer le « bruit » sur le résultat obtenu (figure 113).

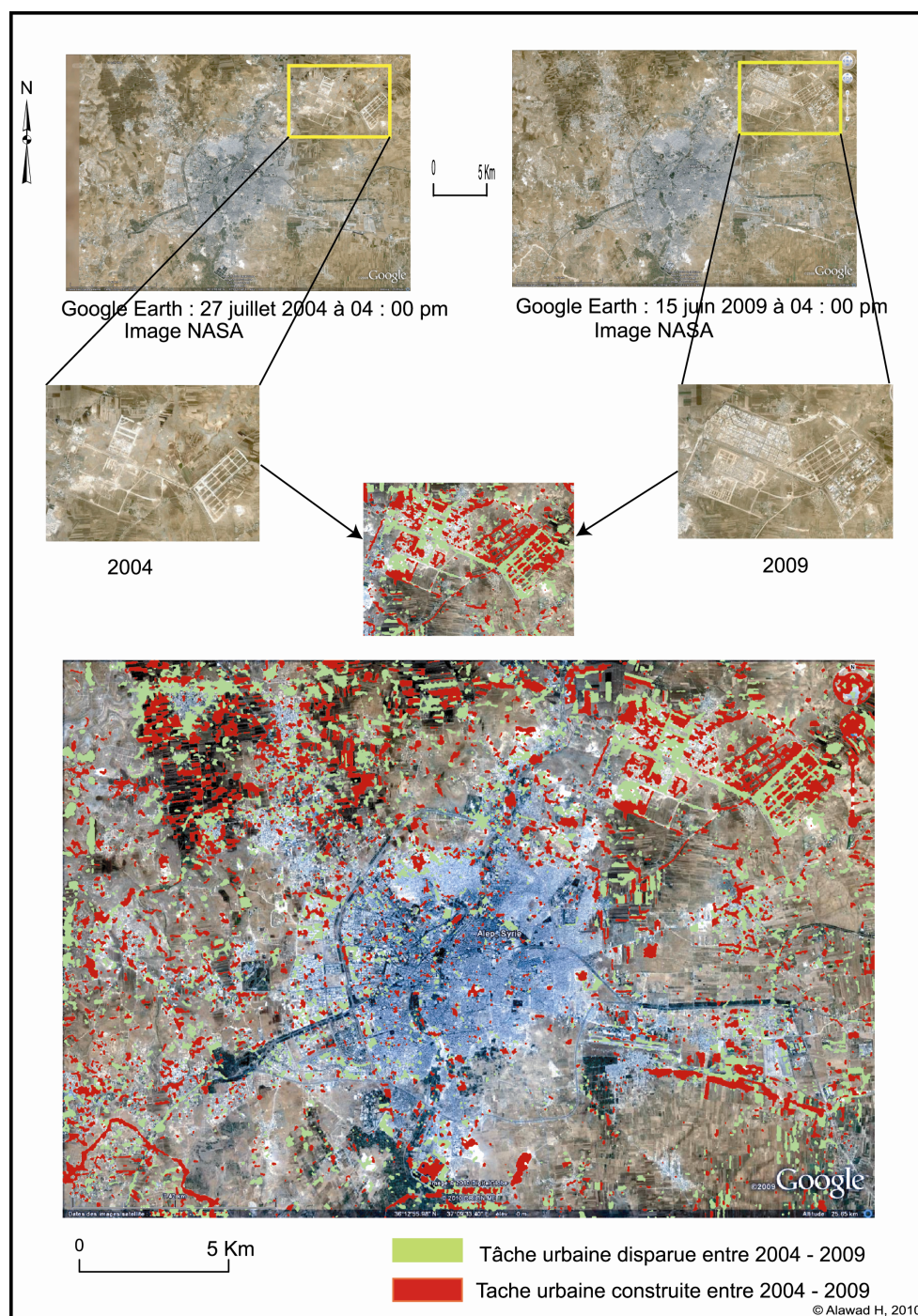


Figure 113. Détection des changements dans la tache urbaine d'Alep (Syrie) entre 2004 et 2009

Le résultat montre un fort réaménagement urbain entre 2004-2009 et un accroissement de l'étalement de la ville dans la périphérie nord. Le réaménagement du territoire apparaît à travers la disparition d'éléments du bâti et à travers la construction de nombreux nouveaux bâtiments entre deux dates qui sont assez proches.

2.5. *Les notions à prendre en compte dans la procédure d'extraction du bâti dans les images numériques*

2.5.1. Bâtiments et habitations en géographie

Pour définir un objet spatial présentant un intérêt d'étude (comme le bâti), il est important de prendre en compte ses caractéristiques physiques, fonctionnelles et économiques (Lhomme, 2005) (figure 114).

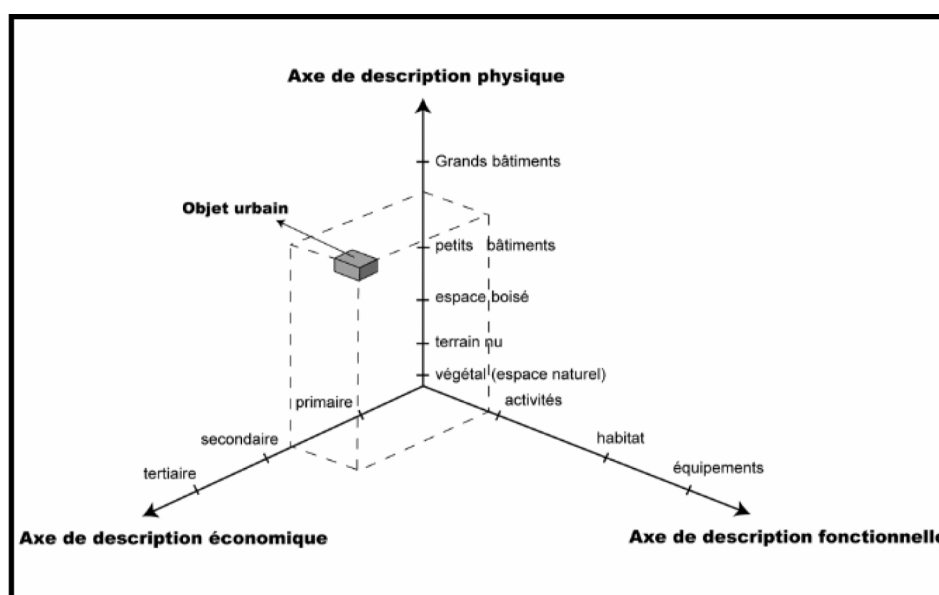


Figure 114. Définition d'un objet urbain (Lhomme, 2005)

Pour les géographes, un élément bâti constitue une unité insécable dans l'analyse spatiale, c'est un objet géographique élémentaire. Il est analysé à partir de son identification et de sa localisation, mais aussi de ses fonctionnalités. Le passage du bâtiment à l'habitation, par exemple, procède d'un changement conceptuel entre l'élément structurel et l'élément social (Devaux, 2006). Les études basées sur des approches qualitatives et descriptives issues de l'observation de terrain sont des domaines riches pour la géographie classique. La position variée des habitations, leur concentration et la forme de leurs regroupements ont donné lieu à de nombreuses typologies des formes de l'habitat rural européen (figure 115).

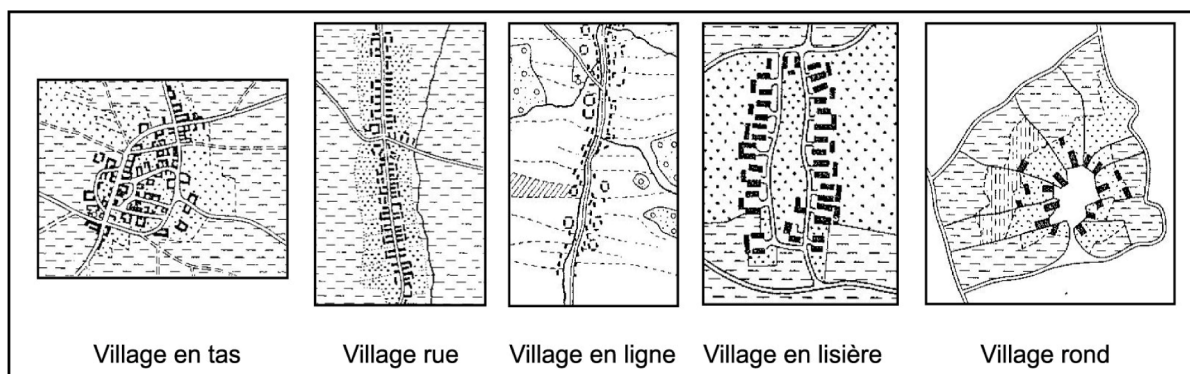


Figure 115. Principaux types des villages proposés par l'école de géographie allemande (Lebeau, 1996)

2.5.2. Changement conceptuel du bâtiment à l'habitation : du structure à la fonction

Le terme bâtiment désigne l'ensemble « *des constructions servant à loger des hommes, des animaux ou des choses* » (Le Petit Robert, 1982). Il délimite ainsi par sa structure « *un espace intérieur séparé de l'extérieur par une enveloppe : la paroi extérieure* » (Le grand dictionnaire terminologique, 2004). Le bâtiment est l'objet physique qui fait le lien entre l'homme et son territoire. Autrement dit, le bâtiment est la signature matérielle de la population sur son espace : « *l'intensité du peuplement se devine d'un simple regard par le nombre d'habitations présentes* » (Deffontaines, 1972). En géographie, la notion du peuplement prend deux approches : une approche historique et une autre, morphologique. L'approche historique concerne la dynamique temporelle (le mouvement démographique) et tente de faire comprendre les façons d'occuper le sol par l'homme au fil de temps. L'approche morphologique se focalise sur la forme de l'occupation humaine d'un espace à un instant précis de l'histoire (Pumain, 1993). L'étude spatiale des bâtiments a donc un lien direct avec celle du peuplement.

Le terme bâtiment concerne avant tout l'aspect structurel et matériel de la construction, dont l'utilité ou la fonction restent vagues. Le terme habitation a plus de sens. C'est le « *lieu où l'on habite* » (Le Petit Robert, 1982) *et qui accueille l'homme seul ou sa famille* » (Le grand dictionnaire terminologique, 2004). L'habitation est donc le lieu qui protège l'homme et sa famille sur un laps de temps, quel que soit le niveau social de l'habitant (Brunet *et al.*, 1993). Le terme bâtiment possède plus de 25 synonymes ou mots voisins, et l'habitation plus de 60 (Bertaud Du Chazaud, 2003). Nicolas Devaux a repéré un certain nombre de termes ou synonymes utilisés à la place de bâtiment. Dans le tableau suivant, pour

chaque terme, une appréciation du contenu structurel ou fonctionnel de la définition a été menée en gardant à l'idée que le terme « bâtiment » a plutôt un aspect structurel (figure 116).

Terme	Définition	Structure	Fonction	Remarques
Abri	Lieu couvert protégeant des hommes ou des animaux contre les intempéries ou quelque danger (1) Habitation rudimentaire, parfois provisoire (2)	+++	+	Connotation rudimentaire et péjorative de la construction, mais affichage de la fonction de lieu de protection
Bâtisse	Construction quelconque, dépourvue de caractère (1) La partie en maçonnerie, le gros œuvre d'un bâtiment ; de grande dimension, parfois notion de laideur (2)	++		Connotation péjorative sur l'aspect de la construction
Caserne	Bâtiment destiné à loger des troupes (1)		+++	Important contenu fonctionnel rattaché à l'armée
Construction	Action de construire quelque chose; résultat de l'action (1) Action de construire ; ce qui est construit (2)	+		L'action prime sur l'élément en résultant
Edifice	Ouvrage architectural aux proportions importantes (1) Bâtiment important (2)	+++	++	Terme rattaché au monumental, peu adapté pour désigner les bâtiments de la vie quotidienne
Immeuble	Bâtiment urbain à nombre plus ou moins important de niveaux, destiné à abriter des appartements, des installations professionnelles ou des bureaux (1) Maison, grand bâtiment urbain à plusieurs étages (2)	++		Rattachement à l'espace urbain, associé à n'importe quelle fonction
Case	Habitation rudimentaire, en particulier en Afrique noire (1) Habitation traditionnelle, en Afrique et dans les civilisations analogues (2)	+++		Terme péjoratif rattaché à l'Afrique, difficilement utilisable dans un contexte géographique différent
Hutte	Abri ou habitation rudimentaire, construite généralement à l'aide de matériaux divers grossièrement assemblés (1) Abri rudimentaire, fait principalement de bois, de terre et de paille (2)	+++		Même remarque que pour abri, forte connotation au rudimentaire

Figure 116. Définitions, contenus structurels et fonctionnels des synonymes du terme « bâtiment » (ATILF- Analyse et traitement informatique de la langue française, 2004 ; Le Petit Robert, 1982)

Terme	Définition	Structure	Fonction	Remarques
Demeure	Lieu où l'on habite, habitation (1)		+	Fonction neutre, mais connotation quelque peu littéraire
	Lieu construit dans lequel on vit (2)			
Domicile	Lieu personnel d'habitation où l'on fixe sa demeure ou son principal établissement (1)		+	Connotations juridique et administrative
	Lieu ordinaire d'habitation(2)			
Foyer	Lieu où l'on fait du feu. Lieu où habite, ou vit une famille. <i>Foyer</i> désigne souvent simultanément le lieu où vit la famille et la famille elle-même (1)		++	Connotations sociologique et démographique
Habitat	<i>Rare</i> : Fait d'habiter, de résider en un lieu (1) Mode d'organisation et de peuplement par l'homme du milieu où il vit (2)	+		Ne désigne pas l'habitation proprement dite mais l'arrangement de plusieurs habitations
Logement	Tout local à usage d'habitation (1)	+	++	Peut être une partie de maison, notion de subdivision de l'habitation, connotation démographique
	Partie de maison, d'immeuble où l'on réside habituellement (2)			
Maison	Habitation de l'homme (1)			Contenu sociologique marqué
	Bâtiment d'habitation (2)			
Résidence	Fait de demeurer habituellement dans un lieu. Lieu où réside un personnage revêtu de fonctions officielles (1)		++	Relatif à des personnes de haut rang, peu posséder des connotations juridiques

Figure 117. Définitions, contenus structurels et fonctionnels des synonymes du terme « habitation » (ATILF- Analyse et traitement informatique de la langue française, 2004 ; Le Petit Robert, 1982)

Le même travail a été effectué par Nicolas Devaux pour le terme « habitation ». Les termes doivent expliciter la fonction sociale et minimiser les connotations structurelles ou disciplinaires (figure 117).

2.5.3. La densité des habitations, une notion variable entre concentration et dispersion

La densité représente le rapport moyen d'un nombre d'objets à une surface définie (Brunet *et al.*, 1993). Elle convertit une information ponctuelle en une autre surfacique. Selon Denise Pumain, la mesure de densité des habitations n'a de sens que si la répartition de la population est relativement homogène sur l'espace (Pumain *et al.*, 1993). Le problème de ce concept est qu'il ne prend pas en compte la forme de répartition des individus dans l'espace. Il ne renseigne pas sur les modes de regroupement spatial d'un phénomène sur espace donné. La figure suivante montre un exemple de densité égale pour une surface donnée avec deux formes déferentes de répartition spatiale des objets (figure 118).

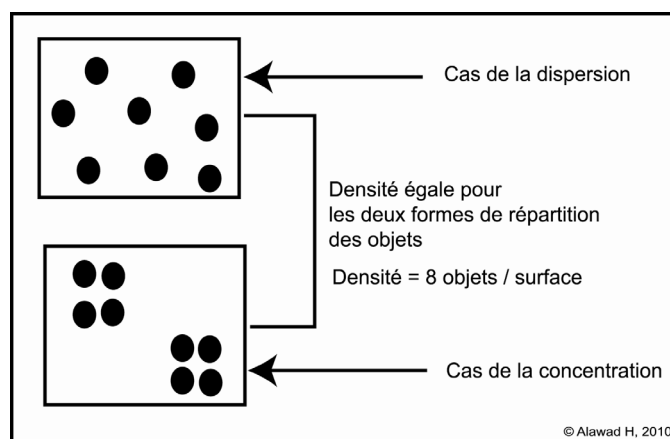


Figure 118. Variabilité de la dispersion spatiale à densité égale

2.5.4. Morphologie de la distribution spatiales des objets

Plusieurs critères morphologiques aident à décrire la distribution spatiale des éléments géographiques. Les critères que l'on retrouve le plus fréquemment dans la littérature sont la taille, la densité et la concentration (Tsai, 2005) (figure 119).

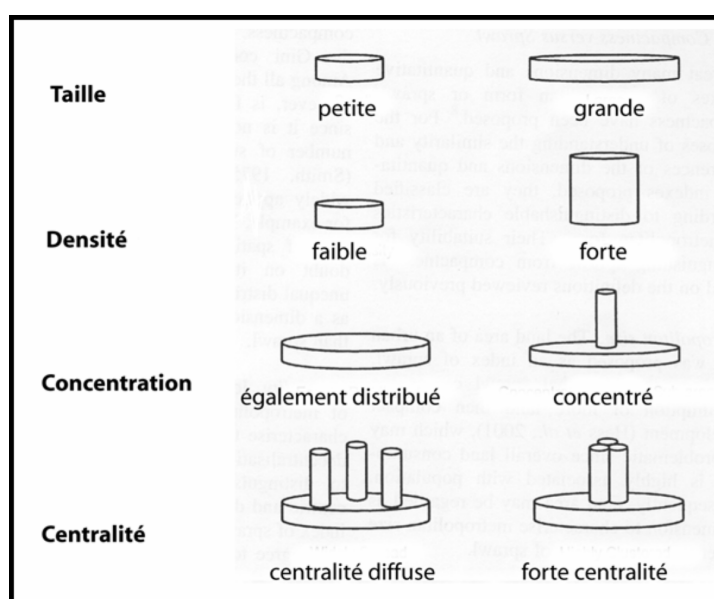


Figure 119. Différents types de critères morphologiques (Tsai, 2005)

La forme de la distribution spatiale d'un thème sur l'image est un élément important pour le processus d'extraction des éléments qui s'y rapportent. La répartition spatiale, régulière ou non régulière, du thème d'intérêt sur l'image et la forme, dispersée, aléatoire ou concentrée, de cette répartition sont indispensables à prendre en compte (figure 120).

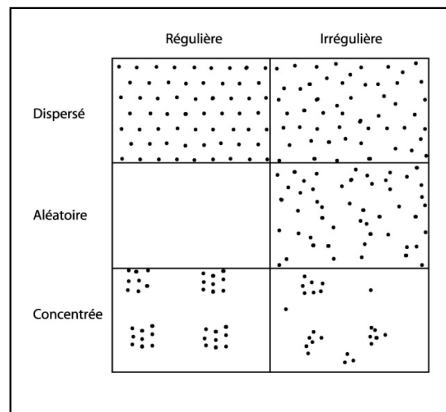


Figure 120. Forme de distributions spatiales de points (Pumain *et al.*, 1997)

L'importance de cette morphologie dans la distribution des éléments apparaît dans la qualité visuelle du thème traité au sein de l'image. L'objectif d'extraction et son échelle d'application ont un lien direct avec la morphologie spatiale. La figure suivante montre deux morphologies différentes de répartition spatiale des bâtiments urbains dans une grande ville syrienne (Alep) à la même échelle spatiale (figure 121).

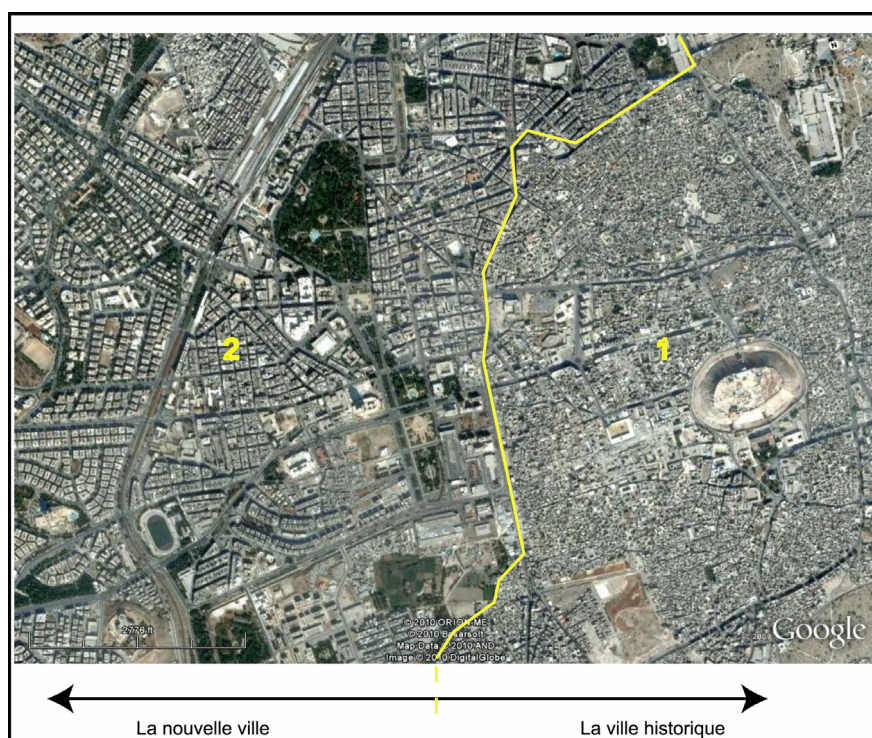


Figure 121. Deux morphologies de la répartition du bâti à la même échelle spatiale

L'échelle spatiale à laquelle on fait une extraction de bâti peut donc aussi varier en fonction de la densité du bâti et de la forme de répartition qu'elle a entraînée.

2.5.5. Les matériaux de construction et leurs effets sur la procédure d'extraction

A l'échelle globale des mondes périurbain et rural, cette étude donne une place prépondérante aux techniques de construction favorisant l'usage des matériaux locaux pour limiter le transport et même les coûts de construction (Deffontaines, 1972). Le poids attribué aux héritages culturels véhiculés par les sociétés entraîne une variabilité matérielle des éléments bâtis et de leurs regroupements. L'utilisation de matériaux locaux tend à augmenter la variabilité physique des bâtiments à l'échelle d'un pays, du monde.

La protection contre le froid, la chaleur, l'humidité... appelle des réponses architecturales différentes. Par ailleurs, la disponibilité des matériaux de construction n'est pas uniforme à l'échelle du globe. Le polymorphisme de la construction des bâtiments résulte de l'expression matérielle des choix économiques, sociaux, religieux et symbolique des sociétés (Brunet *et al.*, 1993), d'où l'intérêt que son étude a suscité (et suscite encore) sous différentes formes chez les géographes.

Dans les zones rurales des pays en développement par exemple, l'utilisation quasiment systématique des matériaux de construction associée à un niveau économique faible a une conséquence directe sur la taille des bâtiments (figure 122). Par contre, en zone urbaine, le mode de construction est totalement différent, en raison des changements de catégorie sociale de la population et de leur niveau économique (figure 123). La localisation géographique influence les modes de construction, attendu que les intempéries dont les hommes doivent se prémunir ne sont pas les mêmes en tous points du globe.



Figure 122. Maison de terre en forme d'ogives, village au sud d'Alep (Syrie)



Figure 123. Mode de construction dans l'habitat urbain, Alep (Syrie)

2.5.6. Influence des objets urbains sur la qualité de l'image numérique

La présence d'« objets urbains » (les bâtiments en particulier) produit des erreurs géométriques pouvant mener à des erreurs thématiques. D'après L'homme, 2003, une étude appliquée sur des images *IKONOS* en 2003 dont le processus de projection est représenté ci-dessous (figure 124), la position de la toiture sur le plan est erronée (figure 124, a). Si le

bâtiment n'est pas perpendiculaire à l'axe de visée, la forme de la toiture subit des déformations (figure 124, b). Dans certaines conditions (grand angle de visée et bâtiments élevés) la façade peut être projetée sur l'image, masquant de ce fait une partie du sol (figure 124, a, b) (effet d'ombre). On a donc des déformations à la fois géométriques et thématiques. Cela signifie qu'il n'est pas possible d'estimer précisément la qualité d'une image avant son acquisition, ce qui est une forte limitation pour les utilisateurs.

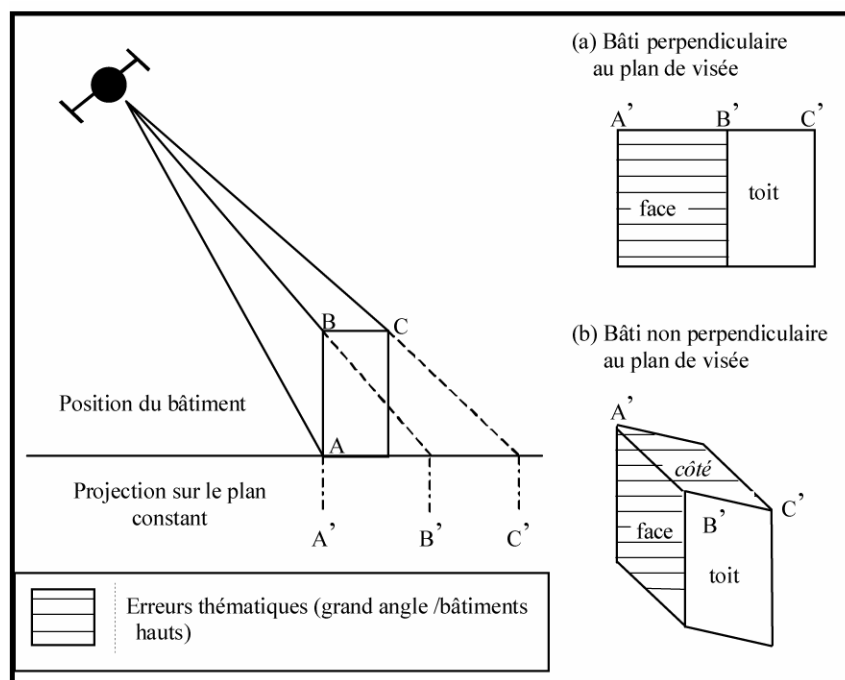


Figure 124. Influence des objets géographiques spatiaux sur la qualité des images numériques (Lhomme, 2003)

Conclusion

Le choix d'une cible à extraire d'une image numérique est lié au degré de visibilité de cette cible. Plus l'objet est visible sur une image donnée, plus le travail d'extraction donnera de bons résultats. La visibilité de la cible au sein d'une image est par ailleurs liée à une échelle spatiale pertinente. La forme de répartition d'un thème sur l'image guide le choix de cette échelle spatiale pertinente.

La bonne connaissance de la nature physique et topographique de la cible est également une exigence indispensable dans le processus d'extraction. La morphologie de la distribution spatiale et les matériaux participant à la construction de l'objet sont par ailleurs des éléments essentiels à considérer.

La bonne résolution spatiale et la bonne qualité visuelle d'images *Google Earth* en font une source d'images très riche. L'accès à des images libres à partir de *Google Earth* ouvre de nouveaux champs d'étude. Le couplage des images avec des techniques de photo-interprétation représente un outil qui semble bien adapté à l'interprétation d'images numériques de haute qualité visuelle comme celles de *Google Earth*.

CHAPITRE 3

Les méthodes d'extraction du bâti par télédétection à partir des images *Google Earth*

Introduction

En télédétection, beaucoup de méthodes sont envisagées pour extraire le bâti par une morphologie mathématique. Quelle que soit la démarche et l'outil retenus, l'automatisation de l'extraction nécessite de faire des choix sur l'image, sur la bande et selon l'objet d'extraction. Lorsque les images ont des bonnes résolutions, spatiale et spectrale, les résultats des analyses obtenus s'avèrent fort satisfaisants. Plusieurs chercheurs (Aplin *et al.*, 1999 ; Ben-dor *et al.*, 2001 ; Puissant and Weber, 2002) ont déjà montré que l'espace pouvait être classifié à l'aide d'images à haute résolution spatiale. Des études ont aussi fait appel à la télédétection spatiale pour identifier des éléments urbains (Hemiari *et al.*, 2004) ou des bâtiments (Brenner and Haala, 1999 ; Lhomme *et al.*, 2003 ; Kemmouche et Mering, 2000 ; Berrada, 2006). De son côté, Gallice-Matti (2006) a défini deux méthodes pour extraire le bâti en utilisant des images satellites. Ces deux méthodes, sur lesquelles il faut revenir, diffèrent essentiellement dans leur première étape, à savoir l'étape de rehaussement d'information.

La première méthode se réfère à ce que l'auteur appelle *Texture par Morphologie Mathématique*, qui est en fait l'addition d'un *bottom-hat* et d'un *top-hat*, soit la différence entre ouverture et fermeture. La deuxième méthode utilise un *gradient morphologique*, c'est-à-dire la différence entre une érosion et une dilatation des pixels. Ces deux méthodes ont profondément modifié le contenu informatif de l'image originale, depuis un assemblage de pixels de valeurs différentes à des textures caractéristiques du bâti et du non bâti.

Pour mettre en avant les structures du bâti, l'auteur utilise la reconstruction géodésique comme l'avait d'ailleurs fait Legevey-Padovani (2002). Les routes et les fleuves interférant avec une détection correcte du bâti, l'auteur a utilisé un masque des routes et des fleuves afin de les retirer de l'image pour qu'ils ne perturbent pas l'extraction du bâti. Cette méthode permet d'obtenir des résultats relativement intéressants, mais qui sont tout de même limités car cette technique nécessite d'avoir un masque représentant les routes et les fleuves. De plus, lors de la reconstruction géodésique, l'auteur précise qu'il faut beaucoup d'essais pour définir la meilleure taille nécessaire pour identifier l'élément structurant.

Lefèvre *et al.* (2002) ont développé leur propre méthode basée sur une opération de transformation binaire. La première étape consiste à « binariser » l'image, non avec un seuil, mais en utilisant une classification non-supervisée basée sur l'histogramme de l'image. Ils obtiennent ainsi plusieurs images binaires (*clusters*) correspondant à des tranches de niveaux de gris représentatif. Un bâtiment pouvant être composé de parties présentes sur différentes

images binaires (variations de couleur du toit par exemple), les auteurs additionnent les clusters par 2, 3 ou plus. Cette technique dépend alors des connaissances de l'utilisateur.

Pour éliminer les objets plus petits qu'un bâtiment, les auteurs utilisent une ouverture, dont la taille de l'élément structurant est définie par une granulométrie bi-dimensionnelle, le pic principal de la granulométrie étant la taille en-dessous de laquelle tous les objets seront supprimés. Si la taille est trop petite, le *cluster* est ignoré. La méthode consiste ensuite à appliquer de la Très Haute Résolution (THR) à des éléments structurants, de taille variable, afin d'identifier tous les bâtiments quelque soit la taille de chaque *cluster*. L'ultime étape est une reconstruction géodésique permettant d'obtenir l'image des bâtiments détectés. Cette méthode est simple, mais coûteuse en temps de calcul. De plus, elle permet de détecter uniquement des bâtiments de forme rectangulaire (Weber, 2007).

L'échelle de travail qui conditionne l'extraction d'une information très fine et aussi complexe que le bâti est un élément qu'il est indispensable de considérer. Cette démarche explique également les difficultés rencontrées pour mettre en concordance les méthodes de traitement et d'analyse d'images, en particulier d'images libres comme celles proposées par *Google Earth* (figure 125). Dans cette optique, cette troisième partie présente les grandes méthodologies de référence en télédétection, en se focalisant notamment sur les travaux d'extraction des bâtiments et les problèmes rencontrés dans ce type d'analyse.

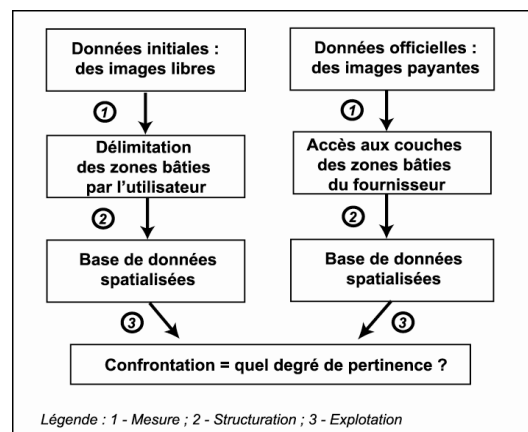


Figure 125. Deux types de données utilisées

3.1. Démarche logique d'extraction d'un objet

L'analyse d'image est largement utilisée pour extraire de façon automatique un objet géographique dans les images de télédétection (Baltsavias, 2004). Le terme extraction «

englobe la modélisation de l'objet à extraire, qui inclut au moins une description géométrique et potentiellement d'autres attributs (radiométrique, spectraux etc.), ainsi que des informations sur les propriétés sémantiques/fonctionnelles de l'objet » (Baltsavias, 2004).

L'objectif premier d'une extraction automatique d'objets géographiques est la mise à jour de bases de données à moindre coût, associées à un gain de temps appréciable (Jensen *et al.*, 2001 ; Unsalan *et al.*, 2005) et à la limitation au recours de photo-interprètes dont la démarche générale repose sur des critères de délimitation des objets plus ou moins entachées de subjectivité qui gênent d'autant sa reproductibilité.

Le recours au traitement automatique des images oblige à utiliser des paramètres de mesures issus directement des images. Elles doivent, par là-même, réduire cette part de subjectivité. Pour autant, le terme « automatique » est souvent impropre dans le sens où l'homme intervient toujours en amont, pendant ou après les procédures de traitement ou d'analyse (Baltsavias, 2004 ; Mayer, 1999). C'est pourquoi on désigne, de plus en plus, les méthodes d'extraction comme étant « semi-automatiques » (Puissant, 2005). Une approche entièrement automatique n'est pas attendue avant au moins une dizaine d'années selon Mayer, qui précise que l'intervention humaine reste nécessaire et incontournable dans les analyses de traitement actuelles, notamment dans la phase d'amorçage des opérations et de validation des résultats (Mayer, 1999). Selon Baltsavias, la démarche d'extraction d'objet des images se décline en quatre phases (Baltsavias, 2004) :

- *définition de l'objet à extraire à des fins de traitement*. Elle dépend du contexte de la problématique et des besoins des utilisateurs finaux des résultats ;
- *passage en revue des données existantes* qui sont de plus en plus intégrées dans les démarches de reconnaissance et d'extraction d'objet, notamment dans les phases de mise à jour de l'information géographique ;
- *choix des données par rapport aux résolutions spatiales et spectrales*. Il faut par exemple tenir compte de la densité de l'objet dans l'image (approche globale de l'image) et de sa complexité physique (caractéristiques propres) qui obligent l'usage de plusieurs vues d'un même objet pour extraire des informations tridimensionnelles ;
- *choix des méthodes*, appelée stratégie, qui découle directement des informations précédentes car c'est l'analyse des caractéristiques de l'objet, des données disponibles et de celles que l'on surajoute qui conditionnent le choix de la meilleure méthode.

3.1.1. Le choix du thème : des pixels à l'objet géographique

La représentation de l'espace géographique en format *raster* peut être comparée à un maillage drapé sur le paysage. Dans chaque cellule du maillage, une valeur correspondant au phénomène géographique prédominant pour le secteur couvert est enregistrée. Dans un *raster* représentant la végétation, chaque cellule enregistre l'espèce végétale prédominante dans la cellule. Dans un jeu de données *raster*, les entités géographiques délimitées dans l'espace comme les parcelles, les routes, ou encore les points d'eau, sont représentées sous forme de collection de cellules ayant les mêmes valeurs et organisées dans une matrice de lignes et de colonnes. Ces *rasters* sont appelés « surfaces ».

Dans les approches classiques de télédétection, l'espace géographique est assimilé à une image formée de pixels. Les caractéristiques radiométriques de cette image sont le lien entre l'espace radiométrique et l'espace géographique *via* le modèle radiométrique. Dans la phase d'analyse d'images, l'image n'est pas plus assimilée à une grille de pixels, mais à des agrégats de pixels formant les « objets » dans l'image. L'identification de ces objets repose sur l'étude de leurs attributs numériques et aussi géométriques et spatiaux (topologie). Ces attributs sont les clés nécessaires à leur appariement avec les objets sémantiques constitutifs d'une représentation formalisée de l'espace géographique couvert par l'image.

Inévitablement, les jeux de données *raster* généralisent le paysage. Par exemple, une cellule peut tomber sur une surface représentant des phénomènes multiples. Mais la cellule ne peut stocker qu'une seule information, une seule valeur. Il existe différentes techniques pour échantillonner la géographie à l'intérieur d'une cellule pour lui assigner une valeur, comme utiliser la valeur trouvée au centre de la cellule ou utiliser la valeur qui recouvre la plus grande partie de la cellule. Dans le cas d'une surface où des cellules peuvent contenir un nombre important de valeurs, on assigne aux cellules concernées la valeur trouvée au centre.

L'objectif de notre démarche est de représenter certaines entités surfaciques et d'en faire une extraction en mode vecteur. La présentation d'une entité devient une collection de cellules ayant la même valeur. Le format *raster* est la meilleure représentation pour analyser la totalité d'un paysage, mais pas pour analyser des entités individuelles. Aussi le passage entre les modes *raster* et vecteur devient évident. Les entités géographiques sont représentées par des points, lignes et polygones avec des coordonnées x,y qui définissent leur géométrie et leurs relations topologiques. Le format vecteur est la meilleure représentation pour dessiner des entités précises et garder l'identité unique de celles-ci (figure 126).

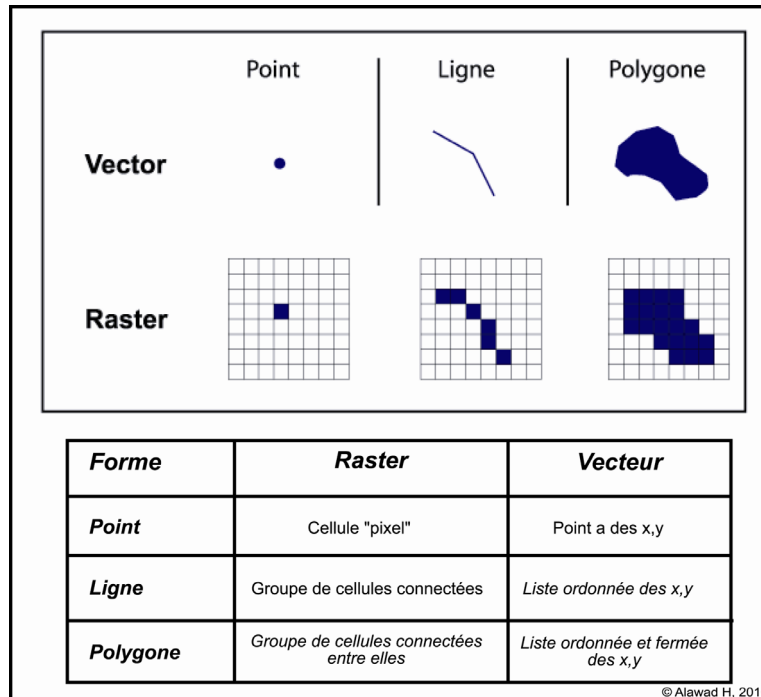


Figure 126. Primitives géométriques spatiales

Dans ce contexte, les tailles des pixels et celle de la cible géographique sur une surface donnée sont des éléments essentiels dans le processus d'extraction. Le choix de la résolution spatiale est bien fonction du niveau d'interprétation souhaité relativement aux caractéristiques physiques du milieu (Woodcock and Strahler 1987). La vectorisation d'une surface permet d'obtenir une grille des pixels vectorisés. La taille de chaque carré est déterminée selon la résolution spectrale de l'image. De son côté, ESRI a défini la taille maximale de ses grilles par un maximum de lignes et de colonnes, soit un total est de 2 147 milliards de pixels. Plus la taille des cellules est petite, plus la résolution est grande et le *raster*, lourd (figure 127).

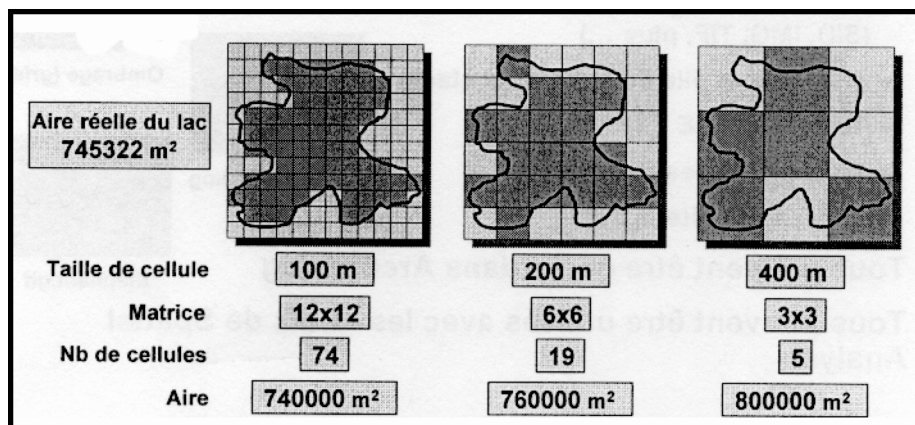


Figure 127. Variabilité de la taille et du nombre de pixels dans une cible géographique (ESRI, 2007)

Passer de l'image originelle à l'identification des objets requiert trois phases résumées dans la figure 128 : le choix des données, le traitement d'image et l'analyse d'image.

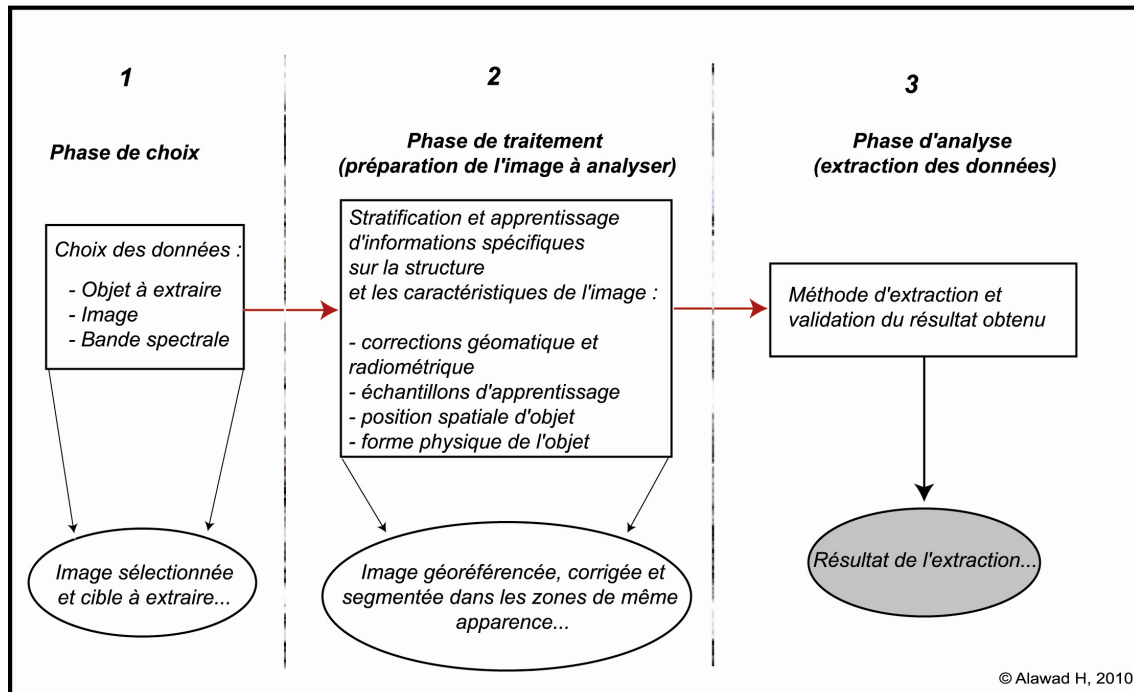


Figure 128. Phases successives d'identification des objets dans une image numérique

3.1.2. Stratégie du choix d'image

La qualité des images a précédemment été définie comme étant « *le degré de fidélité (géométrique et radiométrique) existant entre l'image et la réalité du terrain, ceci indépendamment des méthodes d'interprétation* » (Lhomme et al., 2003).

La qualité d'une image pour un type d'analyse donné peut être évaluée en partie à partir de la compatibilité de la résolution avec l'échelle du phénomène et l'aire d'investigation (Donnay et Unwin, 2001). Ceci touche particulièrement la taille des objets qu'il est possible de détecter, d'identifier ou d'analyser (Baudot, 1997), mais il faut aussi prendre en compte la nature de l'information, c'est-à-dire le type de réflexion enregistrée et la masse d'informations à la fois disponible et à traiter. Le type de réflexion donne les valeurs numériques des pixels correspondant aux valeurs radiométriques de l'image. La table radiométrique qui regroupe toutes les valeurs d'une image a un champ large, qui peut s'étendre de 0 et 2048 niveaux. L'écran numérique réduit les valeurs radiométriques des pixels d'origine de l'image en les remplaçant par des valeurs numériques comprises entre 0 et 255 (le compte numérique) en

gardant le même nombre de pixels. Les signatures spectrales des thèmes sont définies à partir de ce compte numérique de l'image.

L'image résultante est le miroir de l'espace, quel que soit cet espace et quelle que soit l'échelle de travail. Plusieurs effets modificateurs des signatures spectrales d'image peuvent intervenir, qu'ils relèvent d'effets géométriques ou radiométriques : effet atmosphérique, effet d'angle de prise de vue, effet d'angle d'élévation solaire, effet du relief, facteur d'intégration spectrale et spatiale... Tout ceci amène dans un premier temps à préciser le cadre d'analyse de l'objet étudié de façon à mettre en place les éléments clés du choix de l'image.

Les matériaux de construction des bâtiments posent des problèmes d'interprétation et ils vont jouer un rôle non négligeable sur la qualité du résultat :

- les signatures spectrales des bâtiments construits avec des matériaux locaux pour les toitures (terre argileuse, sable dans les régions semi-désertiques ou matières végétales, etc.) ressemblent aux signatures spectrales des terrains situés à proximité ;
- l'ombre générée par les nuages diminue fortement la qualité des images en masquant des zones importantes. L'ombre est due essentiellement à la présence de nuages, et aux reliefs marqués, mais également à la présence d'objets hauts (bâtiments, arbres, etc.), ce qui pose des problèmes d'interprétation d'image.

En combinant les caractéristiques spectrales et spatiales des images, il devient possible d'extraire et de décrire des entités géographiques. La mise à jour et l'extraction de ces formes peuvent être intégrées dans une procédure automatique basée sur une connaissance exhaustive des objets (Drouot, 1995). De façon générale, cette méthode est utilisée dans le cas d'objets possédant des formes caractéristiques. Les routes et les bâtiments sont les meilleurs exemples. Les éléments de géographie physique dont la forme est répétitive font également partie du corpus d'objets identifiables par l'analyse de formes (Callot *et al.*, 1994). En milieu urbain, la reconnaissance de formes est rendue mal aisée par la multiplicité des formes prises par un même objet géographique. La combinaison de plusieurs formes peut cependant permettre d'identifier des éléments urbains pertinents (Terrettaz, 1998) (figure 129).

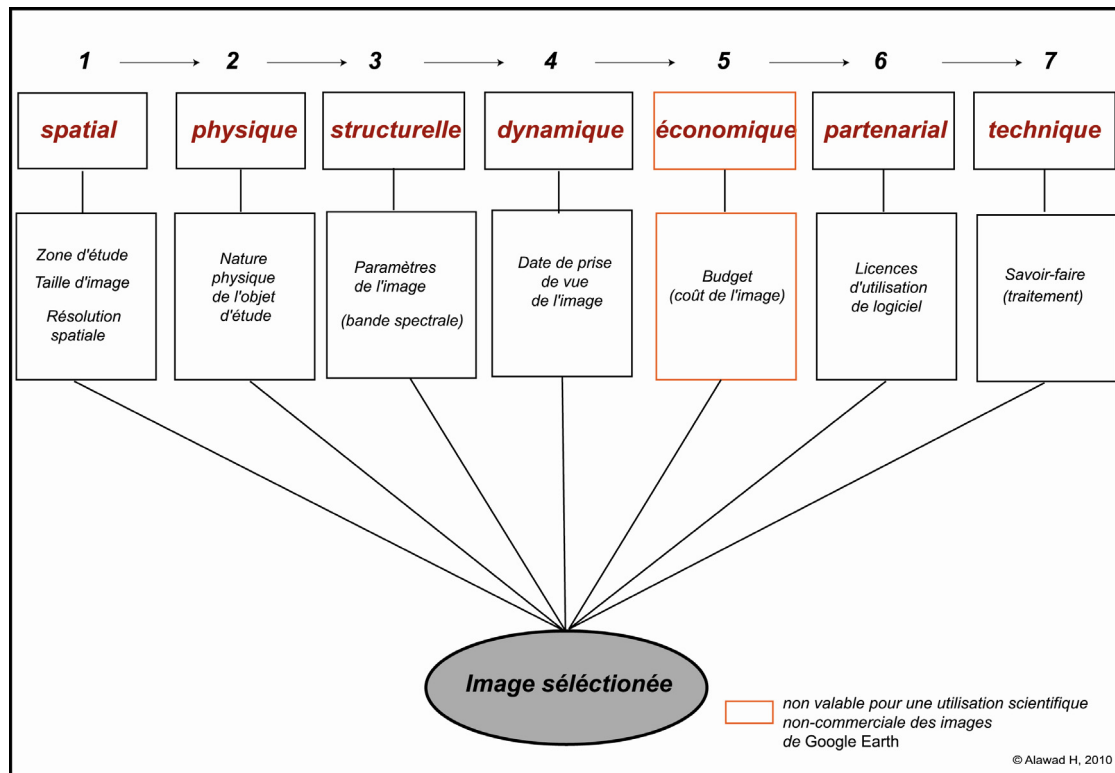


Figure 129. Nature des paramètres à considérer dans le choix d'une image

Notre travail apparaît original, dans ce sens où la méthode automatique d'extraction de données, créée à partir d'images en accès libres comme celles issues de *Google Earth*, se veut également simple. L'intérêt technique de cette approche est de permettre d'utiliser un logiciel de cartographie pour le traitement d'image. L'intérêt économique est de s'affranchir du prix qui reste élevé pour l'acquisition des données (ex. BD-Topo, 500 euros : pour une surface au sol jusqu'à 100 km²). L'intérêt scientifique correspond à une ouverture de nouveaux champs de recherche en géographie, mais aussi à de nouveaux champs d'application jusqu'à présent bloqués par le prix élevé ou l'inexistence de données image.

La démarche dépend essentiellement de la nature du thème de l'extraction. L'échelle d'application, la taille de la cible sur l'image et le degré de visibilité déterminent la résolution souhaitée dans ce type d'application. Plus le thème est lisible et la résolution adaptée, plus le résultat est satisfaisant et la méthode, proche d'être automatisée. Dans le cas d'une image où la résolution reste bien mal adaptée à l'extraction de la cible (mauvaise résolution spatiale), l'utilisateur peut tenter de minimiser les erreurs en effectuant des améliorations manuelles sur le résultat obtenu ou en faisant des classes très générales. La qualité de l'extraction des résultats est liée aussi à l'hétérogénéité spatiale et nécessite alors des améliorations manuelles

plus ou moins importantes. La qualité de l'extraction automatique et les opérations manuelles successives conduisent à qualifier la méthode d'automatique, de semi-automatique ou même manuelle. Le nettoyage manuel est aussi variable selon le temps dont on dispose. Un nettoyage rapide mais toutefois efficace permet une procédure d'extraction semi-automatique. En revanche, pour être efficace, un long nettoyage manuel pourra être nécessaire, mais ce sera aussi une opération longue et fastidieuse (figures 130 et 131).

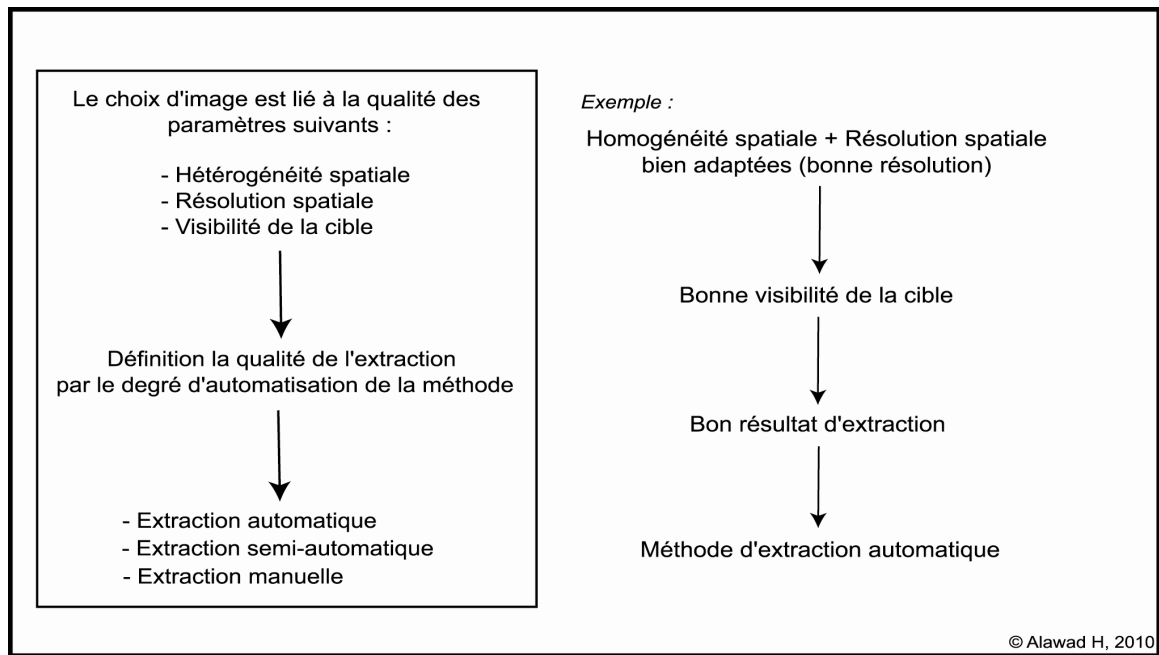


Figure 130. Stratégie du choix d'image

Plans d'écran	Valeurs des pixels sur une plan d'écran exemple de canal Spot							
Rouge	6	11	40	81	65	46	103	61
Vert	14	25	48	104	67	26	24	31
Bleu	39	54	65	120	77	43	43	44
Couleurs visible à l'écran	Bleu noir	Bleu foncé	Beige	Blanchâtre	Grisâtre	Bordeaux	Rouge	Rougeâtre
Objet	Océan	Océan turbide	Vasière	Plage	Urbain	Pins	Prés	Algues

Figure 131. Valeurs des pixels des objets spatiaux dans chaque canal d'une image. Exemple Spot-Image

3.1.2.1. Le choix d'une image dans un espace d'étude

Le périurbain est nettement polarisé et influencé par la ville-centre, notamment pour les services et les emplois (Briquel, 2001). Cependant, le périurbain est également l'espace de la territorialisation exacerbée (Jean et Callange, 1997), c'est-à-dire celui que l'on choisit et « *qui nous appartient plus que tout autre* ». C'est un lieu fondamental car il est choisi pour sa localisation et ses qualités de voisinage direct. Les notions essentielles qui ont été évoquées, formes de l'urbanisation pavillonnaire, épaisseur temporelle de la dynamique et portée du phénomène, sont des éléments clés à prendre en compte dans le choix de l'image.

Notre étude s'est focalisée sur la périphérie du pôle urbain de Livron-sur-Drôme, dans le département de la Drôme en Rhône-Alpes, se situant à une centaine de kilomètres de Lyon, de Grenoble et d'Avignon. La commune présente une superficie de 39.52km² et elle regroupe une population de 8 945 habitants en 1999 (figure 132).



Figure 132. Livron-sur-Drôme (Drôme, France)

Ce choix s'explique par le fait que le bâti est relativement dispersé et que la résolution de l'image est de très haute résolution spatiale sur *Google Earth*. La densité du bâti demeure nettement plus faible que dans la ville (Cesselin et Giordana, 2002). Ce choix constitue un bon test méthodologique puisqu'il permet de vérifier visuellement le résultat d'extraction et

de travailler à une petite échelle spatiale sur un espace périurbain à partir d'une image satellite avec une bonne résolution spatiale (*Google Earth* 1,7 m/pixel) (figure 133).

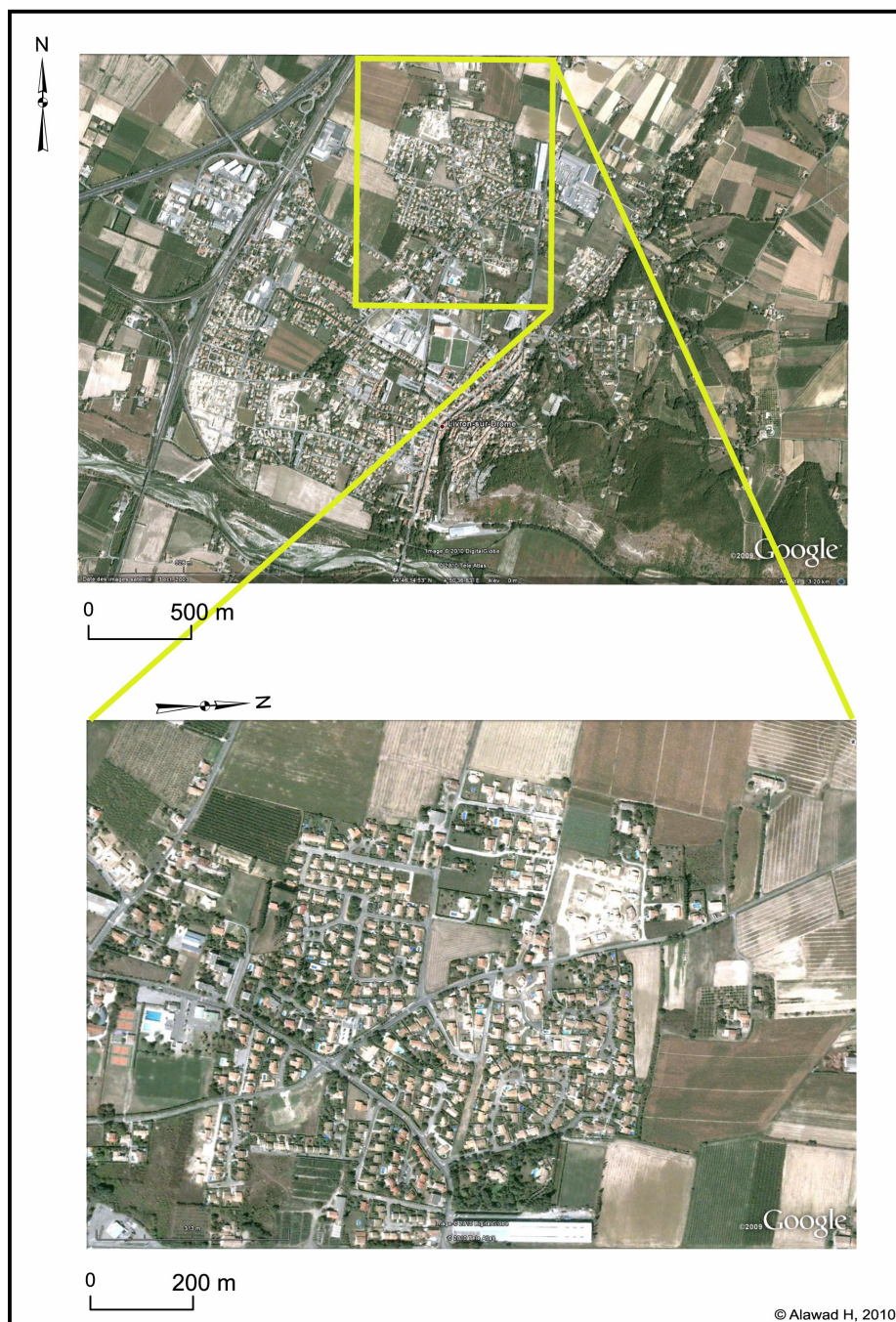


Figure 133. Zone test (Livron-sur-Drôme)⁶⁷

⁶⁷ Date de l'image : 3 octobre 2003 ; source : Digital Globe et diffusée par *Google Earth* 2010

3.1.3. Choix de la bande spectrale d'image à l'aide de la signature spectrale de l'objet

Pour chaque objet observé dans le spectre électromagnétique à la surface de la terre, la valeur de réflectance correspond au rapport entre l'intensité du rayonnement réfléchi et le rayonnement incident d'une surface. Cette valeur varie en fonction de la longueur d'onde. Il est ainsi possible d'obtenir une courbe de réflectance en fonction des longueurs d'ondes dont l'allure générale constitue la signature spectrale de l'objet (figure 134).

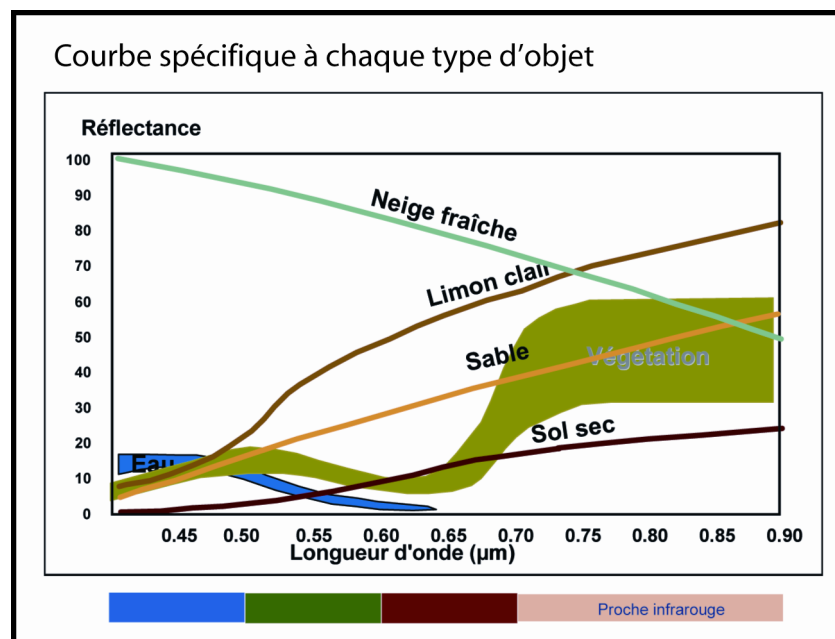


Figure 134. Signatures spectrales de types d'objets spatiaux

Plus la réflectance de l'objet est élevée et l'intensité lumineuse des pixels forte, plus la cible sera claire et, par conséquent, lisible sur l'image. La courbe spécifique aide à choisir la bande spectrale adaptée au type du sol. Ainsi la bande du proche infrarouge (PIR) reste un champ important à considérer pour plusieurs types d'occupation du sol. Par contre, le thème de l'hydrologie sera plutôt étudié à partir du canal bleu de l'image où est enregistrée la réflectance la plus importante.

En cas d'absence de la bande PIR sur l'image ou dans un cas d'utilisation d'une image simple avec trois canaux originaux, on pourra utiliser le canal rouge. La nature physique de la cible et son degré de visibilité sur la bande spectrale sont autant de facteurs à prendre en compte dans le choix des canaux. Généralement les télédétecteurs n'utilisent pas trop le terme de signature spectrale car les effets de prise de vue sur l'image sont très variables. Ces effets

provoquent des changements quantitatifs (quantité lumineuse) dans les valeurs radiométriques et par conséquent dans les comptes numériques de l'image. Le capteur temporel dépend des éléments de l'espace atmosphérique. A l'inverse, les réactions de la cible aux rayonnements sont variables et difficiles à contrôler.

3.1.3.1. Choix de la bande spectrale

Dans les fenêtres spectrales observées, les objets au sol auront un comportement et une « réponse » spécifiques liés à leur état, leur taille, leur physionomie, la période d'observation, etc. Néanmoins, certains faits permettent, *a priori*, de déduire un certain nombre d'hypothèses sur le rapport entre la longueur d'onde et l'objet observé (figure 135). De leur côté, les thèmes photographiques sont caractérisés par des critères photogrammétriques (figure 136).

Fenêtres spectrales (canaux satellitaires)	Objets correspondants
TM1 Bleu	Océan, Lacs, Rivières, Bitume, Stroumpfs...
TM2 Vert	Végétation, Forêt, Cultures, Martiens...
TM3 Rouge	Roches, Villes, Sol nus...

Figure 135. Correspondance des thèmes avec les canaux satellitaires de LandsatTM

<i>Unité d'occupation</i>	Photographies aériennes noir et blanc 1 : 50 000	Composition colorée (rouge, vert et bleu) 1 : 100 000
<i>Forêt marécageuse (mangrove)</i>	Gris moyen homogène, cimes basses et compactes	Rouge grenat
<i>Forêt dense sur sol à forte humidité édaphique (forêt hydrophile)</i>	Gris sombre différencié	Brun verdâtre
<i>Forêt dense de sol ferme</i>	Gris sombre différencié, cimes hétérogènes	Rouge dense
<i>Forêt dégradée</i>	Mosaïque de gris sombre et de gris clair	Moucheté de jaune, orange et bleu
<i>Jachères ou cultures pérennes ombragées</i>	Gris clair à gris moyen	Mosaïque de taches bleu-orange, jaune
<i>Culture herbacée ou recru herbeux</i>	Gris clair	jaune
<i>Habitat</i>	Gris très clair, structure quadrillée	Blanc bleuté
<i>Eau</i>	Gris sombre	noir

Figure 136. Règles d'interprétation des photographies aériennes et des images satellitaires⁶⁸

Dans cette approche, l'objectif est de repérer le bâti sur l'image. La réflectance la plus forte par rapport à cet objectif a été enregistrée par la bande rouge de l'image (plus de 60% du rayonnement réfléchi) (figure 137). Le choix de cette bande, placée entre 0.6 et 0.7 μ m de longueur d'onde, donne accès à la matrice des valeurs numériques associées (figure 137).

⁶⁸ *Télédétection et sécheresse*. John Libbey Eurotext. Paris. 1990, p.197-207.



Figure 137. Bande rouge

3.1.4. Choix de la méthode spectrale (approches classiques)

L'analyse d'image est un terme générique pour désigner toutes les méthodes utilisées pour trier, regrouper et traiter les éléments de base extraits des traitements d'image. L'élément central est le pixel d'image. L'objectif est alors de mettre en concordance une information numérique avec une cible de l'espace considéré. Les pixels regroupés, automatiquement ou manuellement selon leur ressemblance radiométrique, définissent les classes thématiques de l'image. La résolution spatiale influence aussi le pourcentage de mixels obtenus : « *Un mixel est un pixel dont la tache⁶⁹ est occupée par plusieurs types d'occupation du sol. Il montre une signature spectrale « mixte » qui correspond à la somme des contributions des types d'occupation du sol* » (Lhomme, 2005).

La résolution spatiale détermine indirectement les méthodes d'interprétation à utiliser (Woodcock and Strahler 1987 ; Forster, 1985 ; Atkinson and Aplin, 2004). Deux grandes catégories d'analyse existent : la méthode de classification supervisée et celle non-supervisée

⁶⁹ La tache est la surface au sol couverte par le pixel. Le côté de la tache correspondant à la résolution spatiale du capteur (Lhomme, 2005).

(Bonn *et al.*, 1992 ; Girard *et al.*, 1999). Ces deux méthodes et leur application sur des images de *Google Earth* via *ARDAS Imagine 9.3* sont présentées dans les paragraphes suivants.

3.1.4.1. L'approche non-supervisée appliquée aux images de *Google Earth*

Dans cette approche métrique, l'utilisateur ne fournit aucun préalable sur le contenu thématique de l'image ; il se contente uniquement de spécifier le nombre de classes attendues en fin de classification. La méthode la plus couramment utilisée pour ce type de classification est l'agrégation autour de centres mobiles (nuées dynamiques) : il s'agit de déterminer le nombre de classes (choisir le double du nombre souhaité de classes) et ensuite les critères pour arrêter les itérations. Le choix du nombre maximal d'itérations (k), ou seuil de stabilité des classes par défaut, se fait à l'aide de plusieurs méthodes de discrétisations (figure 138).

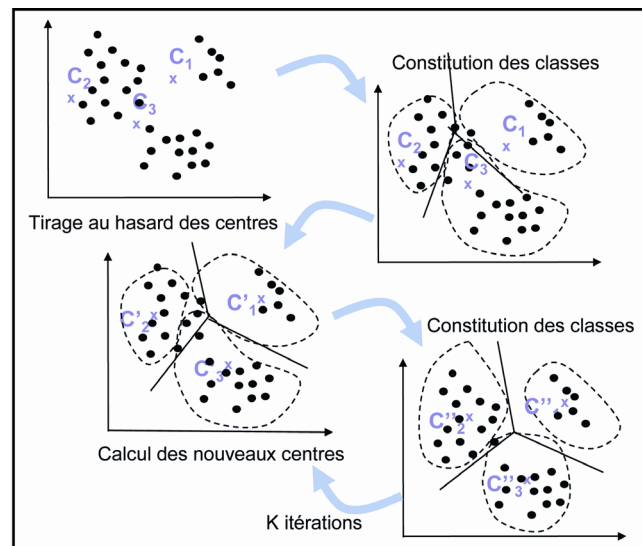


Figure 138. Méthode non supervisée : agrégation autour de centre mobiles (nuées dynamiques)
(TETIS, 2010)

Cette approche spectrale a été menée sur un extrait d'image multi-spectrale de *Google Earth* (figure 139). Avec une résolution de 0.6m l'image représente une partie de la commune de Livron-sur-Drôme. La première étape a été de réaliser des classifications non-supervisées pour évaluer la différenciation radiométrique des objets à identifier (Girard *et al.*, 1999). Dans cette optique, plusieurs classifications ont été réalisées avec un nombre décroissant de classes. La correspondance des classes spectrales issues des classifications et des classes thématiques effectuées par l'utilisateur à l'issue des traitements dépend du choix du nombre de classe attendues et leurs interprétation thématique finale (Girard *et al.*, 1999). Le meilleur résultat

obtenu ici repose sur un découpage en 7 classes avec 6 itérations. Les 7 classes sont basées sur l'intensité radiométrique des pixels. Elles distinguent les pixels les plus clairs (classe 7) et les plus foncés (classe 1) (figure 139).

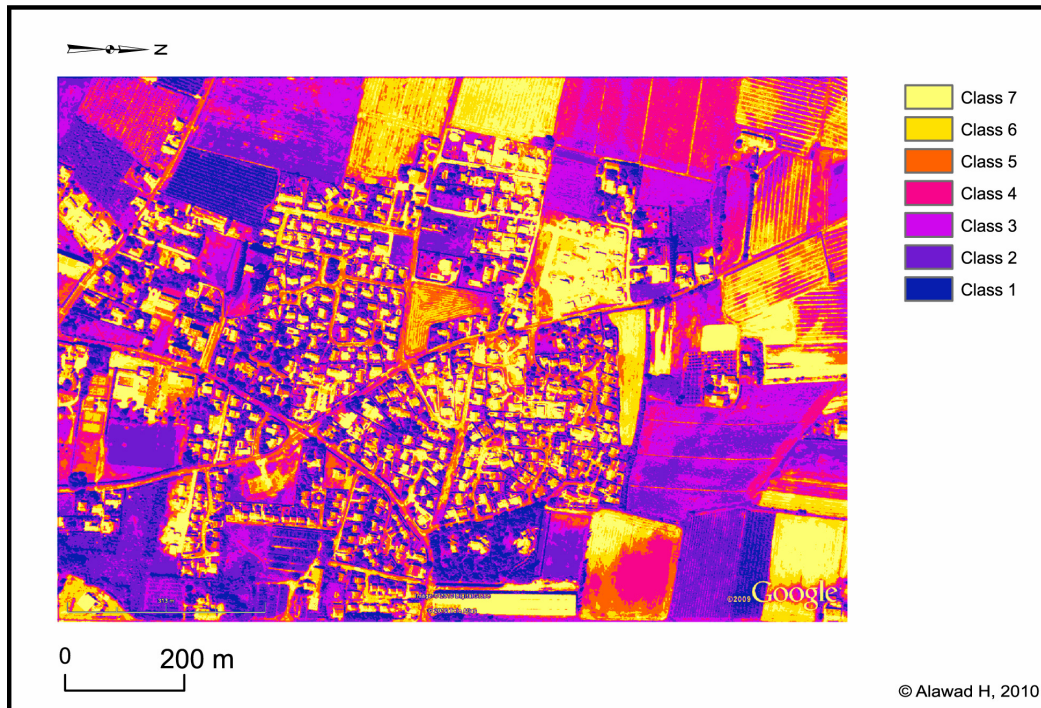


Figure 139. Résultat de la classification non-supervisée de la zone d'étude en 7 classes

3.1.4.2. L'approche supervisée appliquée aux images de *Google Earth*

Les méthodes de classification supervisées sont dirigées par l'utilisateur, étape après étape. « *En géographie, la classification des pixels composant l'image sera le plus souvent une classification dirigée (ou supervisée), qui part d'une connaissance du terrain et du choix d'un certain nombre de sites-tests bien identifiés, qui fourniront des échantillons statistiques en vue de la classification* » (Kergomard, 2003). Après le choix de l'image, l'utilisateur passe par l'étape de stratification pour faire un découpage général de l'espace en zones homogènes, ou « zones d'isoraînement ». L'étape suivante est l'apprentissage, qui consiste à définir les signatures spectrales obtenues permettant de fabriquer les classes souhaitées. La confrontation du résultat de la classification aux connaissances de terrain est la dernière étape pour évaluer les classes, avant la production de cartes thématiques, statistiques, de l'occupation du sol...

Trois types de classification supervisée s'offrent à l'utilisateur (figure 140) :

- *classification supervisée par la distance minimale* : c'est une méthode métrique (paramétrée) qui regroupe visuellement les pixels d'image par calculer les distances minimales entre eux. Dans cette approche, tous les pixels d'image sont classés ;
- *classification supervisée par hypercubes* : c'est une méthode arithmétique (non paramétrée) de seuillage visuel. L'utilisateur définit le seuil du thème d'image et il est possible de trouver des pixels non classés ;
- *classification supervisée par un maximum de vraisemblance* : c'est une méthode statistique basée sur la représentation des fonctions de densité, de probabilités conditionnelles d'un attribut x pour des points images provenant de 2 classes $C1$ et $C2$. Dans cette optique, l'utilisation d'indices de ressemblance est courante et il est possible de trouver des pixels non classés.

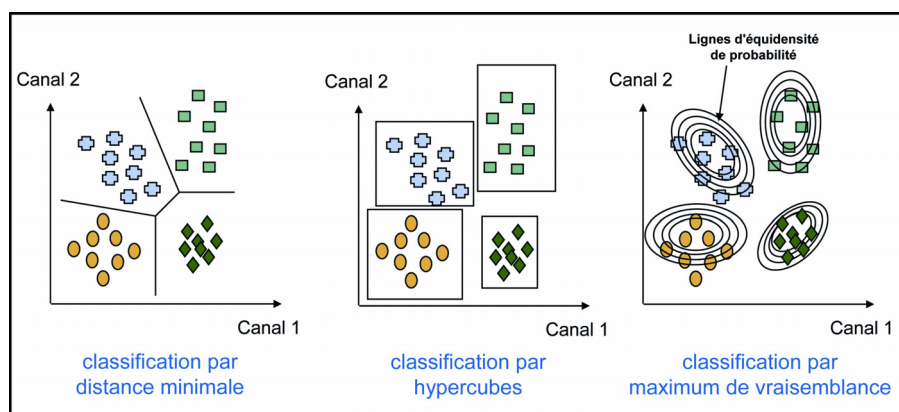


Figure 140. Comparaison des méthodes de classification supervisée

Choisir une méthode plus qu'une autre dépend avant tout de la structure des données. L'approche mathématique permet d'atteindre un taux d'erreur minimal. Les méthodes les plus simples utilisent le seuillage radiométrique pour distinguer quelques grands types de surfaces. « *L'application de la technique du seuillage à plusieurs canaux est appelée classification hypercube. La méthode plus complexe du maximum de vraisemblance utilise les probabilités pour aboutir à une classification à la fois plus souple et plus précise* » (Kergomard, 2003).

L'application de la « méthode supervisée par hypercubes » a été testée à partir d'une image de Livron-sur-Drôme. La démarche consiste d'abord à prendre des échantillons qui vont permettre de détecter les bâtiments sur l'image. Six échantillons de bâtiments composent six couches de classes différentes de bâti. L'étape suivante revient à choisir les classes qui

correspondent le mieux aux données de terrain et de préparer leur regroupement dans une seule classe thématique (habitation). Une série de 4 filtrages de type « majorité 5*5 » a été ensuite appliquée aux résultats. L'utilité de ces filtrages est d'effacer les erreurs d'extraction dans les cellules de bâti, en essayant de faire un nettoyage automatique (figure 141).

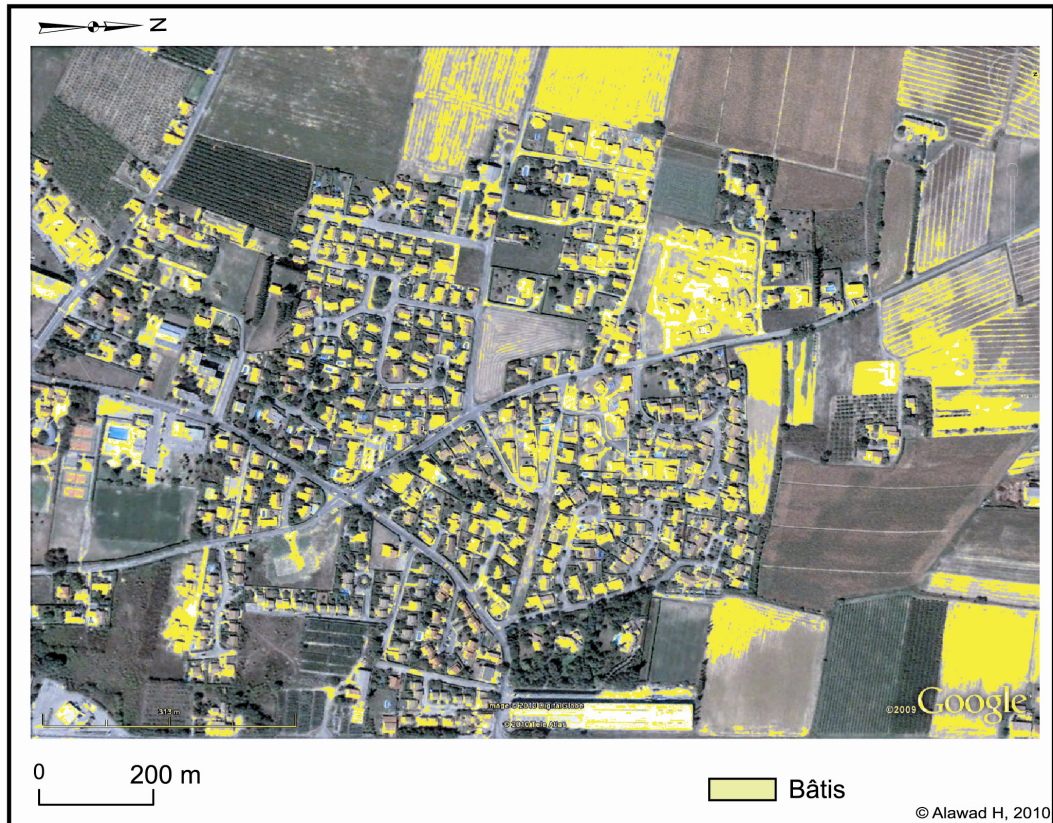


Figure 141. Classification par la méthode supervisée des hypercubes

3.2. *Problèmes rencontrés dans un tel type d'analyse*

L'hétérogénéité spatiale de l'image pose des problèmes à la majorité des méthodes de classification des images par pixels. Cette hétérogénéité mène à une hétérogénéité spectrale des thèmes d'image. La figure 142 montre une image obtenue par affichage de ses canaux d'une manière différente sur les plans d'écran. Ce type d'affichage montre les bâtiments en couleur verte. En revanche, les champs situés à proximité des bâtiments prennent la même couleur, ce qui pose problème si on veut extraire automatiquement des bâtiments. Ces erreurs d'extraction seront corrigées par une intervention manuelle sur les résultats préliminaires de l'extraction et conduisent donc à qualifier cette approche d'extraction de semi-automatique.



Figure 142. Hétérogénéité spectrale et le problème d'extraction

3.3. *Effet d'échelles et perception de la cible*

Le choix de l'échelle d'analyse et la résolution spatiale correspondante dépendent de l'objectif recherché. « *En dehors des perturbations géométriques, l'interprétabilité spatiale d'une image est essentiellement déterminée par la relation entre l'échelle d'interprétation et la résolution spatiale des images* » (Lhomme, 2005). L'échelle de la carte est une notion essentielle et parfois mal comprise en dehors du monde de la cartographie et de la géographie. Afin de représenter une portion de la surface terrestre, la surface doit être réduite. La mesure de cette réduction est exprimée par un ratio appelé échelle de la carte. Elle est définie comme le rapport entre une distance sur la carte et une distance sur le terrain. La mesure de l'échelle renvoie donc à ce rapport qui est le taux de réduction appliqué à une distance donnée pour que cette distance puisse être représentée sur la carte.

En télédétection, la résolution spatiale est associée à l'échelle (Cao and Lam, 1997). Elle détermine la taille des objets (ou structures) identifiables (Welch, 1982 ; Puissant, 2003),

mais aussi la taille de la zone couverte par une image. Dans ce contexte, les cartes à petite échelle représentent une grande étendue de terrain, mais ont une résolution spatiale faible. Par contre, les cartes à grande échelle représentent de petites surfaces de terrain et ont une haute résolution spatiale, montrant alors plus de détails. Les entités étudiées sur des cartes à petite échelle représentent, de manière plus juste, les entités du monde réel parce que le facteur de réduction est plus petit que pour une grande échelle. Lorsque l'échelle de la carte diminue, les entités doivent être simplifiées. Par exemple au 1/100 000e (1 cm = 1 km), il est difficile de représenter les entités dont la longueur ou la largeur est inférieure à 100 m, parce qu'elles feraient 1 mm de long ou de large sur la carte.

Dans la détection des éléments de bâti, on recherche l'apparence de chaque unité de bâti. Un seuil *inter-bâtiments* doit être défini et appliqué pour permettre la distinction des unités de bâtiments proches et nécessite donc de déterminer une échelle de travail adaptée à chaque mode de construction de ces éléments géographiques. Plus ce seuil est élevé, plus l'échelle d'analyse peut être petite. Un seuil élevé sépare les bâtiments les uns des autres, et ensuite l'extraction des pixels de bâtiments permet la fusion des polygones de bâtiments. Les bâtiments ruraux ou même pavillonnaires urbains représentent alors un champ d'application très important (Devaux, 2006) comme l'illustre le tissu urbain à Alep (figures 143, 144).

Echelle de restitution	Habitat rural représenté sur une carte IGN 1/25.000
1/5.000	
1/10.000	
1/25.000	
1/50.000	

Figure 143. Comparaison des effets d'échelle sur la restitution de l'habitat, extraction à partir d'une image Quickbird d'une résolution de 2,4 m (Devaux, 2006)

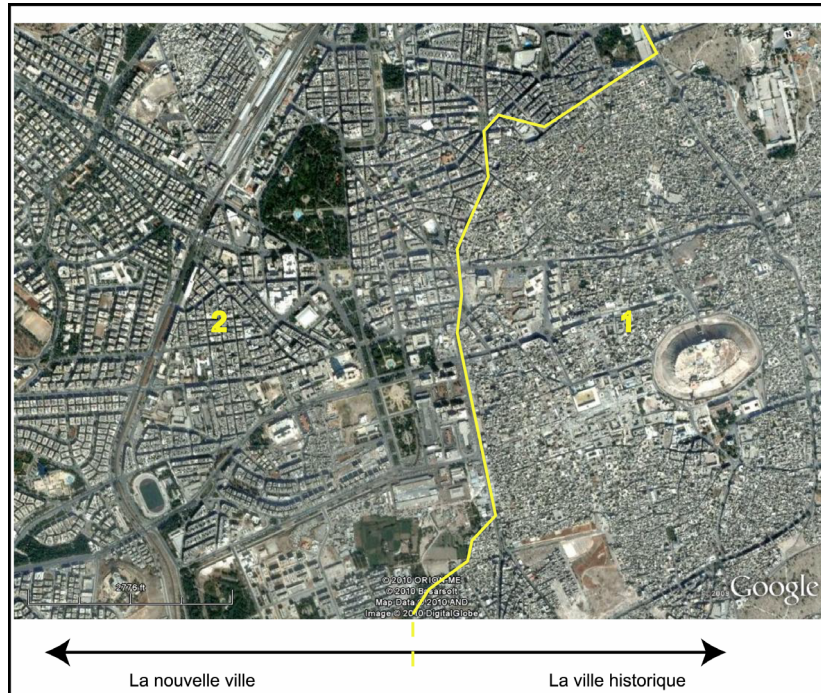


Figure 144. Différences dans le mode d'organisation de l'habitat et conséquences pour l'appréhension de l'échelle de travail (Alep, Syrie)

3.4. *Qualité comparée d'une extraction de signature spectrale par deux logiciels*

Une extraction a été effectuée sur la tache urbaine d'une ville syrienne de taille moyenne (800.000 habitants) au bord du fleuve Al-Fouratte (Raqqqa), à l'aide de deux outils pour comparer la qualité de leurs résultats : *ERDAS Imagine* et *Arc-GIS* (figure 145).



Figure 145. Variété des modes de construction à Raqqqa (Syrie)

La figure suivante montre le résultat de la première approche automatique d'extraction réalisée à l'aide du logiciel *ERDAS Imagine 9.3*. L'utilisation de cet outil a permis de dégager un échantillon de 23 classes de pixels pour déterminer la couleur thématique des bâtiments et par conséquent, pour sélectionner leurs valeurs numériques sur l'image donnée. L'affichage d'une ou plusieurs classes en même temps peut donner un résultat d'extraction différent. Pour arriver à obtenir le meilleur résultat, il est plus qu'indispensable de regrouper deux ou trois classes (figure 146).

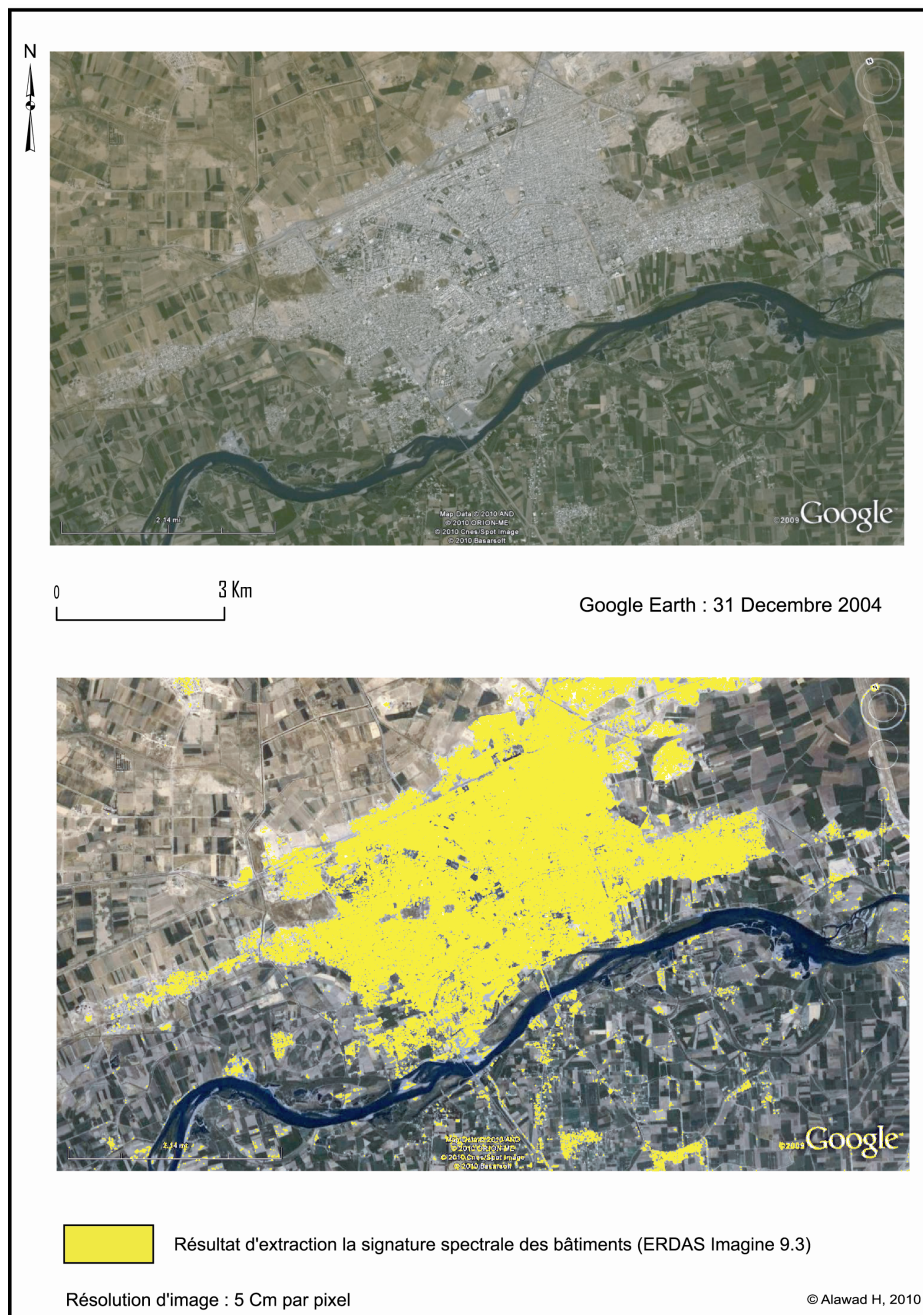


Figure 146. Résultats d'extraction automatique

La seconde application a été réalisée à l'aide d'*ArcGIS 9.3* en recourant à un seuillage des valeurs radiométriques des bâtiments sur la bande rouge de l'image. Les valeurs de seuils de bâtiments retenues pour cette approche se situent entre 128 et 195 (figure 147).

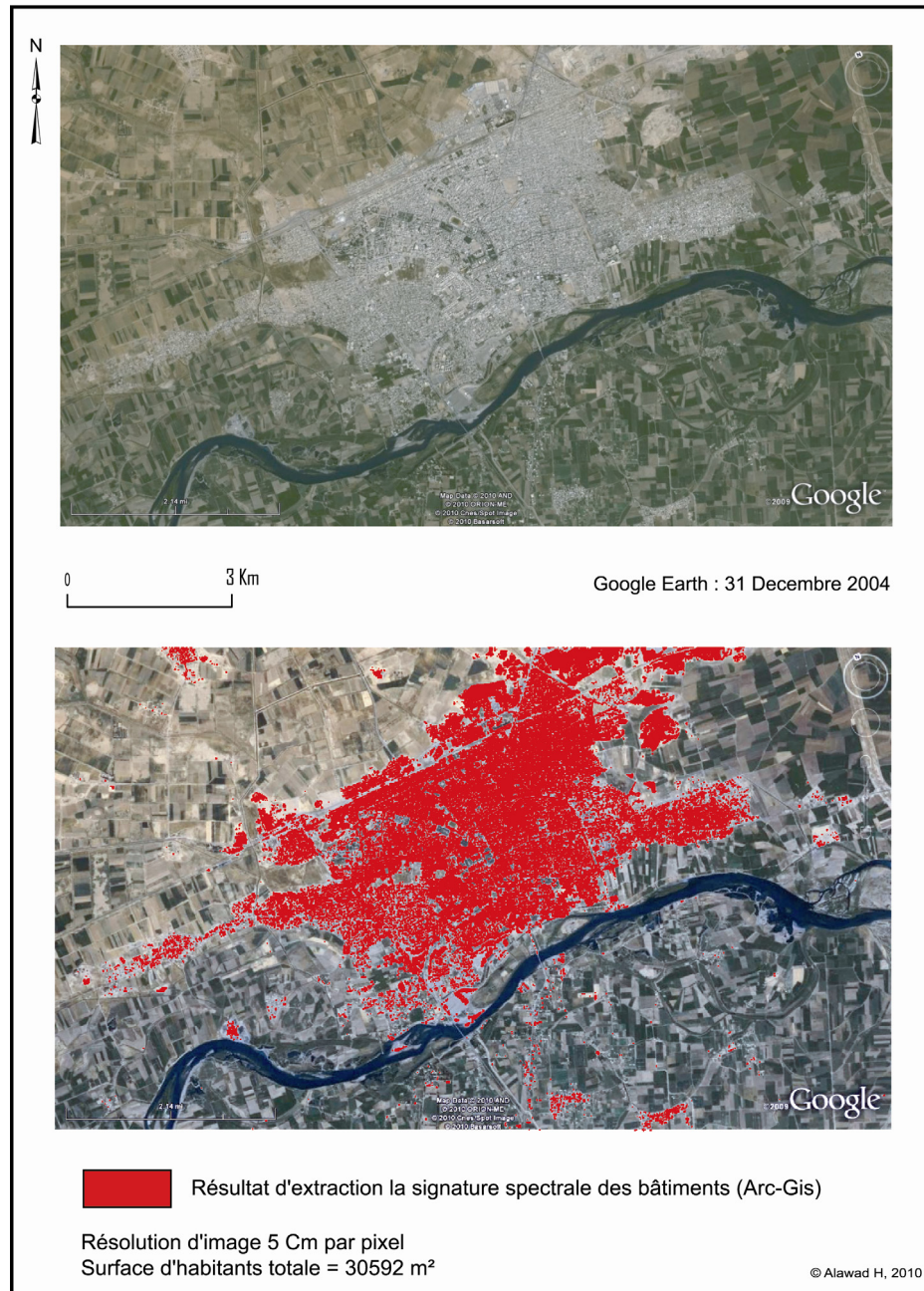


Figure 147. Résultats d'extraction automatique

Les valeurs de pixels des seuils varient selon l'échelle à laquelle on travaille et selon les effets géométriques ou atmosphériques modificateurs des signatures spectrales du thème

sur l'image. L'application répétée de cette méthode de seuillage sur plusieurs types d'images dans différentes zones du monde montre que la variabilité spectrale reste toujours délimitée par ces deux valeurs de pixels (128-195) et qu'elle ne les déborde pas. En général, le résultat montre que les valeurs numériques des pixels correspondant aux couleurs des bâtiments sont également différentes selon la bande spectrale d'image étudiée.

Le tableau suivant donne le seuil des pixels de bâtiments au sein de chaque bande spectrale et les valeurs moyennes calculées par *ERDAS Imagine* dans le format *jpg raster automatique* (figure 148).

Bande spectrale	Valeurs minimales	Valeurs maximales	Valeurs moyennes
1	172	183	178
2	173	184	179
3	159	170	165

Figure 148. Valeurs numériques de bâtiments dans les trois bandes d'une image sous *ERDAS Imagine*

A partir d'*ArcGIS*, l'extraction automatique se fait sur une seule bande spectrale de l'image (la bande la plus adaptée au thème retenu sur l'image). Intervient ensuite la vectorisation de cette bande (la bande rouge 1) qui fait le passage vers le format objet (vecteur) (figure 149).

Bande spectrale	Valeurs minimales	Valeurs maximales	Valeurs moyennes
1	128	195	143

Figure 149. Valeurs numériques de bâtiments à partir d'une seule bande de l'image sous *ArcGIS*

La nécessité de passer d'un format *raster* à un format vecteur (vectorisation) apparaît évidente dans le cas d'utilisation d'*ArcGIS*, puisqu'une extraction des valeurs de pixels n'est pas possible à partir d'un format *raster*. Les étapes d'interprétation d'une image numérique pour l'extraction d'un thème spatial sont possibles en passant par un SIG sans avoir besoin de faire un passage par la photo-interprétation. Mais « *il est souhaitable de coupler les SIG aux logiciels d'analyse d'images* » (Voiron, 1995).

En revanche, l'interprétation d'une image par la technique de la photo-interprétation n'empêche pas l'intégration de ces résultats dans les SIG. « *Les données, les images ou les classifications issues du traitement numérique de la télédétection sont aujourd'hui souvent exploitées dans les Systèmes d'Information Géographique. Les SIG sont des logiciels spécialisés dans le maniement et le croisement d'informations géographiques numérisées, en vue de l'analyse et de la gestion des territoires* » (Kergomard, 2003). La figure suivante montre, d'après Kergomard (2003), les procédures de travail en télédétection (figure 150).

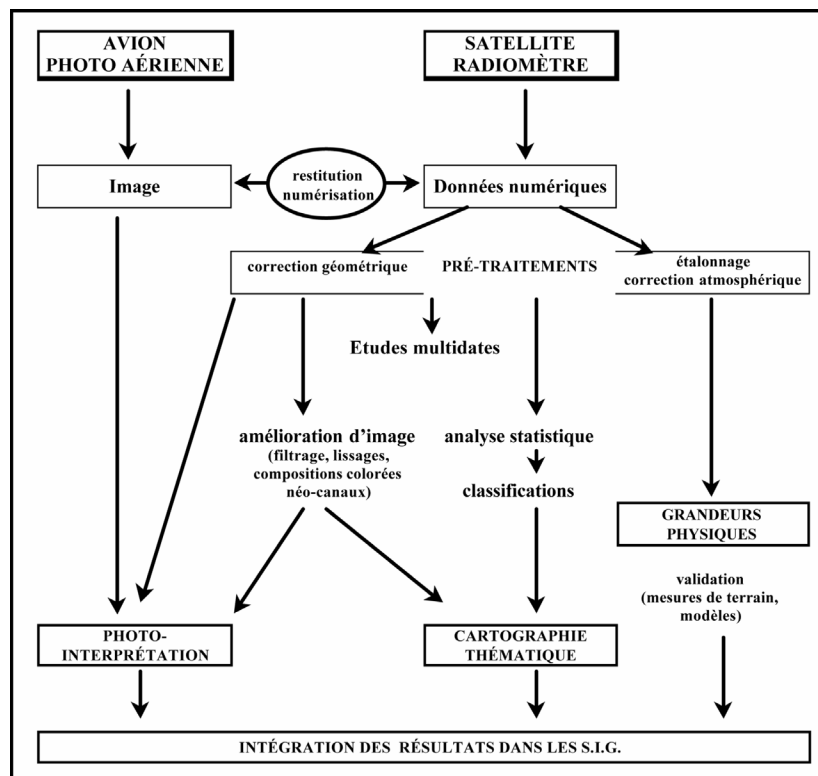


Figure 150. Méthodes de travail en Télédétection (Kergomard, 2003)

En conclusion, l'utilisation d'*ArcGIS*, apparaît plus pratique avec le format vecteur par rapport au logiciel *ERDAS Imagine 3.1* dans ce type d'analyse. L'interprétation manuelle est rapide et relativement simple, ce qui en fait une méthode semi-automatique opérationnelle.

Conclusion

La qualité visuelle de l'image dépend de différentes conditions, à la fois géométriques et atmosphériques, la résolution spatiale, l'échelle spatiale du travail, le choix de la bande spectrale et le choix de la méthode d'extraction apparaissent donc comme des éléments de base qui peuvent varier selon l'objectif de l'extraction. Plus la cible sur l'image est fine, plus l'échelle spatiale de l'application est grande et la haute résolution spatiale d'image nécessaire. L'extraction d'une tache urbaine à petite échelle spatiale n'exige pas une image à une très haute résolution spatiale. Par contre, la bonne résolution spatiale est une exigence pour extraire les bâtiments à grande échelle spatiale. « *Sur les images satellitaires, la question du choix de l'échelle se pose donc en terme de choix de résolution spatiale* » (Lhomme, 2005).

Dans une approche de l'exploitation des données-images, l'objectif d'extraction, le choix de l'image d'application, la bande spectrale correspondante et la méthode d'extraction adaptée à l'objectif constituent les éléments-clés du protocole qui doit impérativement être appliqué avec soin pour une bonne qualité de résultats.

CHAPITRE 4

**Vers une nouvelle approche méthodologique d'extraction du bâti
à l'aide d'un SIG : intérêts et limites**

Introduction

Après avoir étudié et présenté les méthodes les plus courantes d'extraction de données à partir d'images à différentes échelles spatiales, ce quatrième chapitre présente une nouvelle approche d'extraction de données en accès libre, en particulier à partir des images de *Google Earth*, tout en faisant appel à un SIG. La méthode nécessite de disposer d'une connexion Internet, de pouvoir télécharger *Google Earth* et d'accéder à un logiciel SIG, par exemple ArcGIS. La méthode se décompose ici en trois phases :

- *choix* de l'image, de l'objet et de la bande spectrale ;
- mesures radiométriques, *traitement* géomatique et amélioration visuelle ;
- *analyse* du choix de la méthode d'extraction des pixels. Cette phase d'interprétation comprend huit étapes qui doivent être scrupuleusement respectées et sont l'objet d'une présentation dans ce chapitre (figure 151).

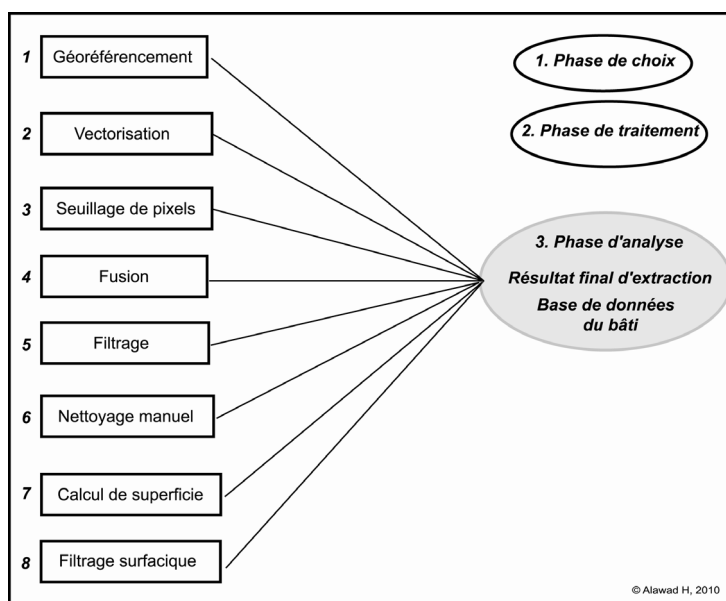


Figure 151. Etapes de la phase d'analyse dans la procédure d'extraction

4.1. Les étapes d'extraction des éléments bâtis

Notre méthode relève d'une classification supervisée où des regroupements de pixels représentent des classes thématiques. Pour analyser facilement l'image, à l'aide d'un logiciel de cartographie, il est nécessaire de changer le format *raster* en format objet *vecteur*. Ce

changement de format aide à détecter les pixels correspondant à l'objet étudié (figure 152). Les paragraphes suivants exposent les différentes étapes d'analyse de cette nouvelle approche d'extraction de données géographiques en prenant le cas du bâti.

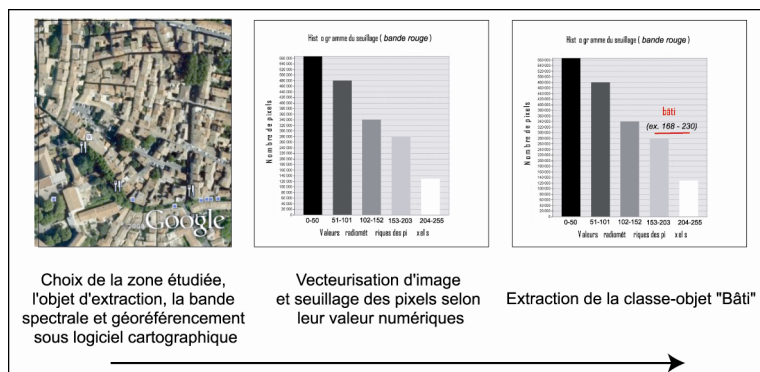


Figure 152. Principe d'extraction d'une cible à partir d'une image (ex. bâti)

4.1.1. Etape du géoréférencement

Google Earth utilise la projection cylindrique simple dans sa base d'images. Il s'agit d'une projection cartographique où les méridiens et les parallèles sont des lignes droites équidistantes, avec des intersections à angle droit. Cette projection est également appelée Lat/Long WGS84. Ce système permet d'accéder aux coordonnées géographiques de chaque point de l'image consultée. Comme *Google Earth* permet d'enregistrer les images en format JPG, l'image doit être ensuite géoréférencée avant de commencer l'interprétation. Toutefois *Google Earth* offre aussi la possibilité d'enregistrer les images dans le format KML, qui garde alors le calage et le géoréférencement de la source d'origine (figure 153).

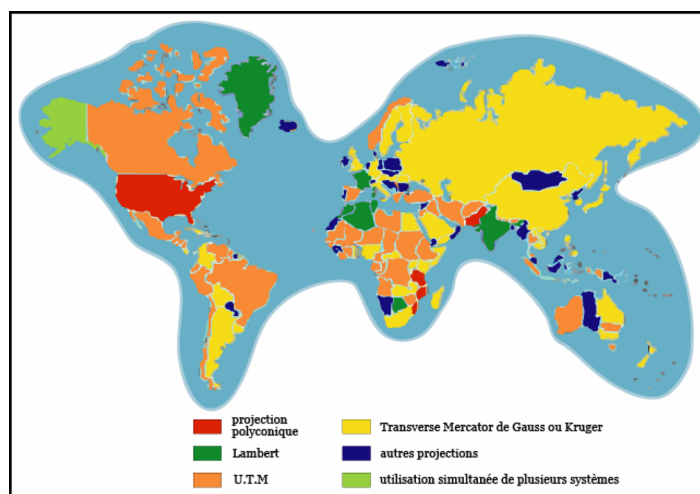


Figure 153. Principaux systèmes de projections utilisées dans le monde (SIGEA)⁷⁰

Pour intégrer les images dans un SIG, il est indispensable de les projeter dans un système de coordonnées. Cette projection nécessite d'identifier au minimum les coordonnées de trois points (trois pixels) et au maximum neuf sur l'ensemble de l'image. En France, l'IGN fournit ces points, mais cette ressource n'est pas universelle. Dans les images en accès libre comme celles de *Google Earth*, les coordonnées géographiques sont accessibles et dans un SIG, on peut créer des points correspondant à ces coordonnées. Pour projeter les images de manière systématique, on peut s'en remettre aux fonctionnalités des logiciels SIG qui ont presque tous une fonction de *géoréférencement*.

Les coordonnées des points de référence permettent de calibrer le *raster*. Le géoréférencement permet d'établir une relation entre les coordonnées matricielles d'une image *raster* et les coordonnées réelles (géographiques ou projetées) (figure 154). Dans nos exemples, le géoréférencement a été réalisé à partir de points de calage sur les angles de bâtiments existants. Une fois l'opération de géoréférencement terminée, le *raster* sera utilisé pour la suite des analyses.

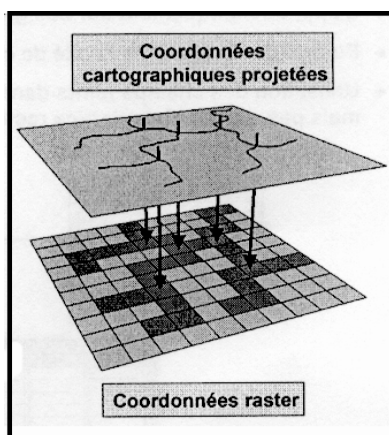


Figure 154. Géoréférencement en *raster* (ESRI, 2007)

4.1.2. Etape de vectorisation de l'image

Cette opération permet de transformer une image en mode « *raster* » composée d'une matrice de pixels en mode « vecteur » (point, ligne et polygone). Le choix des primitives graphiques (point, ligne et polygone) est lié à l'objet que l'on souhaite extraire. Une fois

⁷⁰http://sigea.educagri.fr/fileadmin/user_upload/public/Ressources_pedagogiques/Supports_de_cours/Projections/a_projec-FR_PPT.pdf

vectorisé, l'objet composé initialement par des pixels est alors représenté par des symboles en mode « vecteur ».

Dans le cas d'une extraction semi-automatique ou même manuelle, il est nécessaire de corriger les résultats pour minimiser les erreurs et cela consiste à comparer visuellement ces résultats avec l'image d'origine. Dans le cas où l'on utilise des images sur l'espace français, les couches thématiques d'occupation du sol de l'IGN en accès libre (*Géoportail*) constituent des références pour faire des comparaisons valables à des dates de fabrication identiques. Sinon, il faut tenir compte des écarts de date entre les deux sources. Dans le cas de Buis-les-Baronnies, le résultat obtenu à partir d'images récentes de *Google Earth* et les couches de l'IGN correspondent à des dates différentes : il y a 5 ans d'écart entre les deux sources. La méthode paraît donc mieux adapter sur des zones rurales ou péri-urbaines diffuses qui connaissent des dynamiques de développement modérées, voire très faibles.

La transformation du fichier *raster* en fichier vecteur (vectorisation de l'image) se fait dans le module d'analyse spatiale d'*ArcGIS* (*convertir*)⁷¹.

4.1.3. Etape du seuillage de pixels

Une image est composée de pixels. Chacun d'eux possède une valeur radiométrique liée à une valeur numérique par canal de l'image. Dans l'exemple d'une image SPOT, chaque pixel a trois valeurs différentes, c'est-à-dire une dans chaque bande de l'image. Ces valeurs sont codées sur 8 octets et elles se répartissent sur 256 niveaux de gris. On peut observer la fréquence d'apparition des différents niveaux de gris dans une image monocanal par un histogramme unidimensionnel. Tous les logiciels de traitement d'images et certains logiciels de cartographie ou de SIG permettent de visualiser cet histogramme et de calculer des valeurs statistiques comme : moyenne, écart-type, médiane... L'analyse de cet histogramme peut être intéressante pour détecter de l'information peu ou pas visible sur l'image, pour observer la forme de la distribution, pour vérifier l'existence de plusieurs classes significatives, etc.

A partir d'un histogramme unidimensionnel de l'image, le seuillage est très sommaire. Cependant il permet d'isoler facilement des thèmes spatiaux à partir de l'observation des discontinuités dans la forme de la courbe des valeurs radiométriques. Par exemple, le seuil de

⁷¹ Le choix de la conversion se fait dans un sens ou dans l'autre (rasterisation de l'image).

l'eau est facilement identifiable dans le canal infrarouge (figure 155). Ce principe de seuillage permet aussi de constituer des groupes de pixels représentant un thème à partir desquels il est possible de calculer des indices de texture.

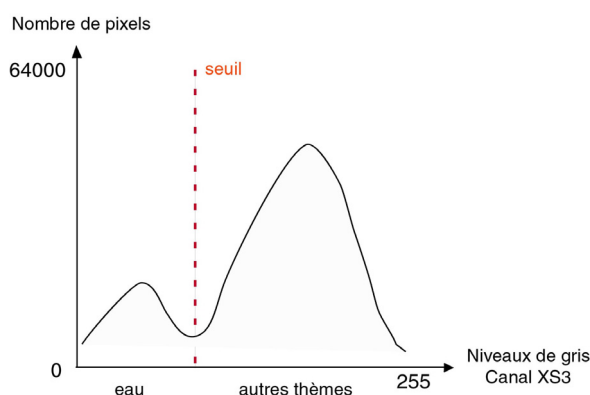


Figure 155. Principe de seuillage (IGN, 2005)

On peut effectuer une classification visuelle de l'histogramme, mais on a généralement recours à une méthode automatique pour pallier la complexité des images. Dans les méthodes automatiques, on trouve deux familles différentes : les classifications non supervisées et les classifications supervisées. Les méthodes non supervisée proposent des regroupements selon la structure des pixels présents dans l'image, sans information *a priori* sur les zones que l'on souhaite identifier, tandis qu'une méthode supervisée cherche à assimiler tous les pixels de l'image à des pixels de zones d'observation particulières dites « zones d'apprentissage », définies géographiquement sur l'image ou radiométriquement sur l'histogramme. Un simple seuillage radiométrique de type supervisé a été réalisé sur le plan rouge de l'image pour conserver les valeurs numériques correspondant à des éléments bâtis. La figure suivante montre le seuillage correspondant aux bâtiments (figure 72) appliqué sur l'image de Buis-Les-Baronnies. Pour cette image de 1 438 800 pixels à l'échelle de 1/5000, la taille de l'image sur écran est de 27,3 cm de hauteur et de 18,3 cm de largeur. Les seuils de délimitation du bâti sur la bande rouge se situent entre les valeurs 168 et 220 (figure 156).

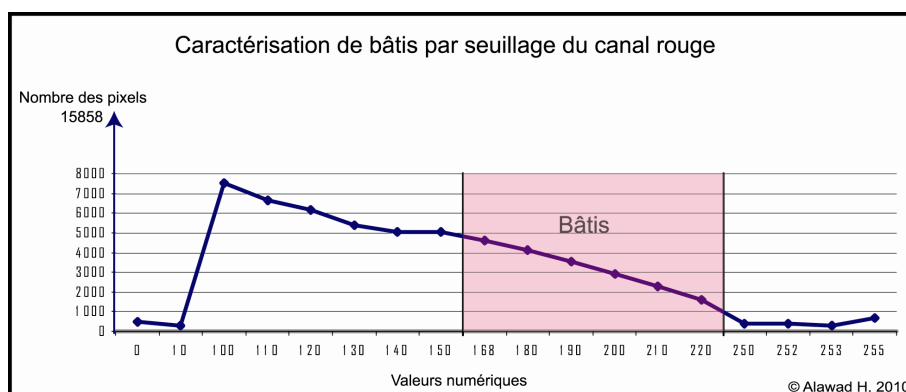


Figure 156. Seuils du bâti sur le canal rouge de l'image

4.1.4. Etape de fusion des pixels vectorisés

Cette opération est la plus importante car elle permet de regrouper les pixels vectorisés qui forment chaque unité de bâti (figure 157). Cette fonctionnalité des SIG permet d'obtenir un polygone pour un ensemble de pixels contigus. L'opération reste cependant limitée du fait du recours à des logiciels commerciaux d'un coût élevé comme *ArcGIS 9*.

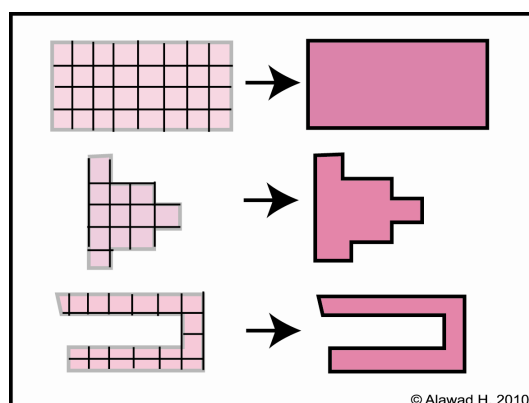


Figure 157. Principe de l'opération « fusion »

Ce choix technique est appliqué, dans un premier temps, de manière visuelle sur les pixels et, dans un deuxième temps, sur le tableau des valeurs de pixels associés. Le résultat permet de construire une base de données *vecteur* des polygones de bâti.

4.1.5. Etape de nettoyage automatique par filtrage

Cette étape permet d'appliquer un nettoyage majoritairement automatique sur des données *raster* pour réduire l'effet de bruit souvent présent dans les images satellites. Elle permet notamment de supprimer les pixels isolés sur l'ensemble de l'image, la taille d'un seul

pixel n'étant pas suffisante pour former un polygone bâti dans le cas d'image à très bonne résolution spatiale (taille des pixels comprise entre 0,5 et 2 m). Cette opération sur données *vecteur* se fait à partir de l'observation des ressemblances établies avec les objets de l'image.

4.1.6. Etape de nettoyage manuel

Cette étape permet d'effacer les erreurs de vectorisation inhérentes à la procédure d'extraction. La difficulté de cette étape est d'éviter que le nettoyage automatique des erreurs supprime des pixels représentant les bâtiments. Une option dans les SIG (« *éditeur* ») permet de sélectionner et d'effacer les pixels vectorisés par erreur dans une image donnée. Cette étape conduit donc à appeler cette méthode de semi-automatique.

4.1.7. Calcul de superficie

Le logiciel calcule la surface de bâtiments obtenue à partir du nombre de pixels formant chaque unité bâtie. Cette opération permet d'obtenir la surface de chaque polygone bâti et aussi la surface totale du bâti dans une zone définie ou sur l'ensemble de l'image.

4.1.8. Filtrage surfacique

Suite à l'étape de fusion, des groupes de pixels fusionnés peuvent ne pas être des bâtiments à cause de leurs tailles insuffisantes (erreurs d'extraction). Ces fausses unités de bâti peuvent être supprimées automatiquement, par sélection de toutes les unités de taille égale ou inférieure à une surface donnée. Cette étape nécessite donc de définir la surface de bâti la plus petite sur l'espace donné avant de supprimer les polygones inférieurs à cette surface. Toutefois, si l'image est de résolution spatiale insuffisante pour repérer le bâtiment le plus petit, il faut avoir une bonne connaissance de terrain. Le filtrage surfacique est réalisé pour ne conserver que les surfaces se rapprochant de celles du bâti. Mais il pourra néanmoins subsister des différences entre la surface calculée et celle sur le terrain pour d'autres raisons. Le problème est celui des bâtiments dont une partie de la toiture est dans l'ombre pour des raisons d'inclinaison du soleil, de forme de toiture (conique etc.) ou parce qu'ils sont dans l'ombre d'autres bâtiments : les surfaces repérées sont alors réduites et des éléments de bâti peuvent disparaître.

4.2. *Cartographie du résultat final de l'extraction*

Une présentation des résultats peut se faire sous forme cartographique. Deux types de données cartographiables sont possibles, celui de données vecteur (couches d'entités bâties) et celui de données *raster* (images). L'intérêt de la cartographie n'est pas de représenter successivement les données de l'un ou l'autre type, mais de les combiner car la visualisation qui en résulte constitue un élément d'analyse supplémentaire impossible à obtenir autrement. Un SIG comme *ArcGIS* permet de réaliser des cartes thématiques des couches « vecteur » superposables aux données « *raster* » d'origine. Cette possibilité d'affichage permet de comparer les couches « vecteur » obtenues avec les cellules *raster* d'origine correspondantes. Cette superposition visuelle permet ou non de valider le résultat d'extraction de la méthode.

4.3. *Exemple d'application nationale sur une commune drômoise : Livron-sur-Drôme*

La méthode d'extraction a été appliquée sur une petite commune drômoise de 8 945 habitations (2007), à une échelle de 1/200 m (figure 158a, 158b). La comparaison des données obtenues (figure 158c) avec les données officielles diffusées par l'IGN (site *Géoportail*) (figure 158d) montre une bonne similitude dans les résultats, en dépit d'un écart de 3 ans entre les dates. La différence entre les deux couches d'informations est faible pour la surface bâtie, mais sensiblement plus importante pour le nombre d'unités (415 par rapport à 340 pour *Géoportail*). Cet écart peut aussi s'expliquer en partie par les différences de date. Les sous-estimations sont liées aux « accessoires » : bordures de piscine, clôtures de maison. Les secteurs sous-estimés se trouvent dans les zones d'habitat collectif et zones d'activités (figure 158e, 158f).

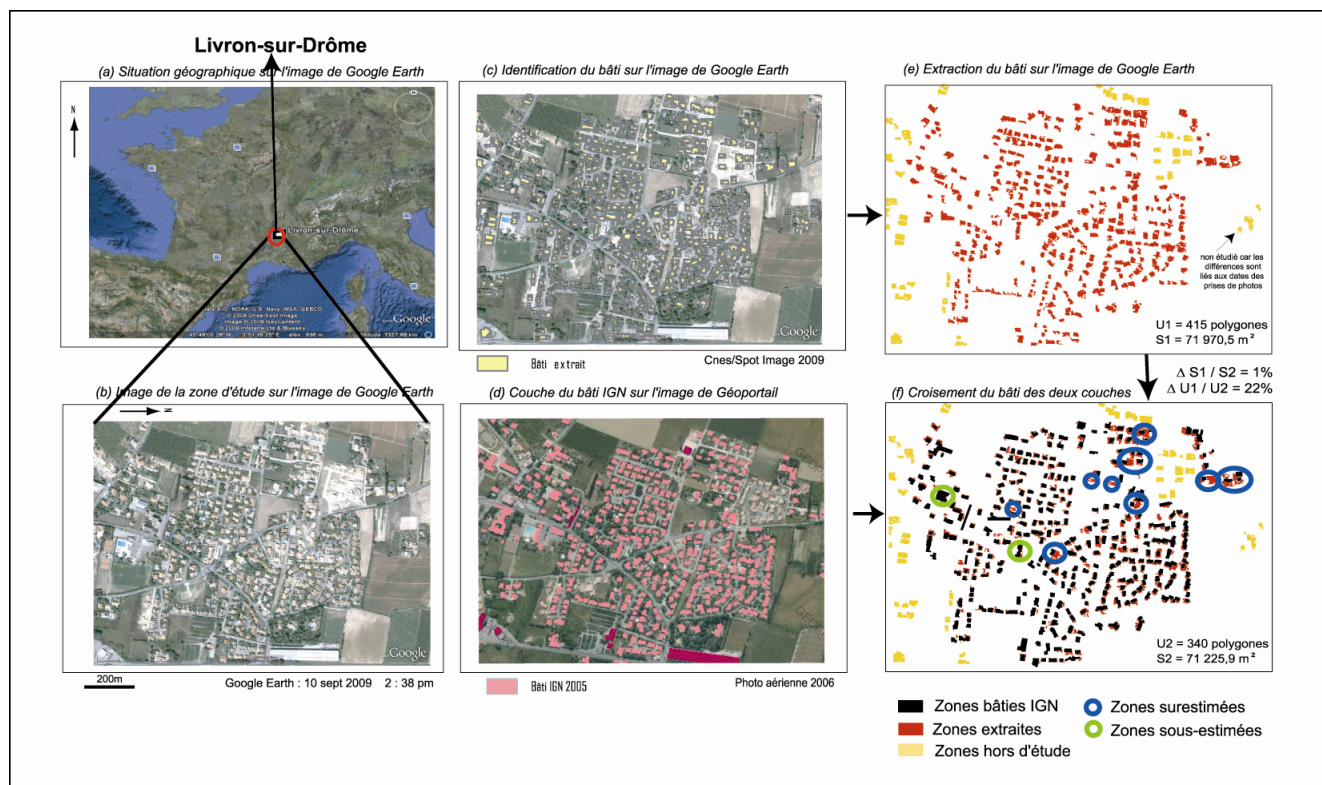


Figure 158. Extraction du bâti sur la commune Livron-sur-Drôme (H. Alawad, 2010)

Ce type de démarche est valable sur le territoire français en raison de l'existence d'une source de référence comme *Géoportail* : la comparaison valide les résultats (figure 159).

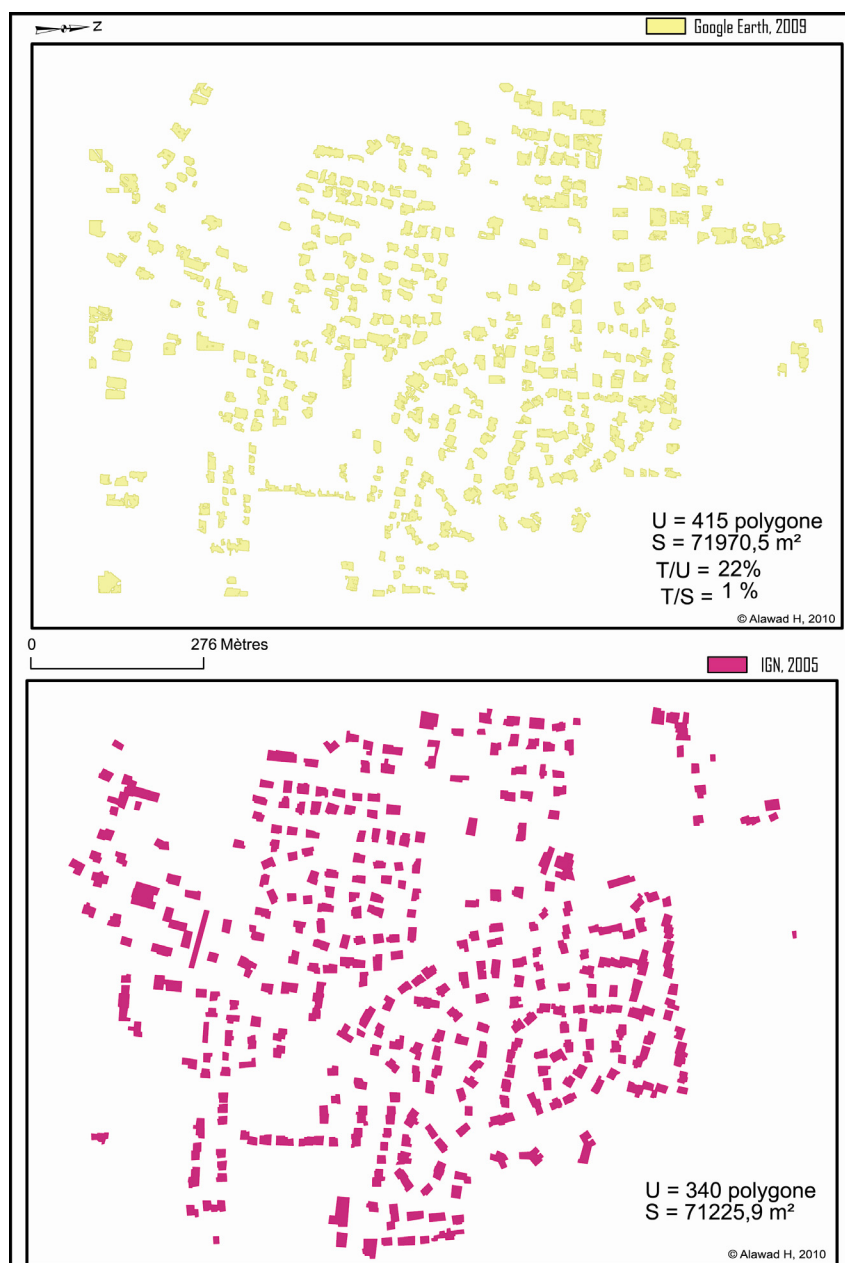


Figure 159. Comparaison des résultats d'extraction de *Google Earth* et *Géoportail*

4.4. Exemple d'application internationale sur une commune syrienne : Dier-el-Zor

Le second test de la méthode a été mené sur une commune de Syrie, Deir-el-zor, à l'échelle du 1/1 000e. L'application montre pourtant des résultats différents selon la forme de la distribution spatiale de l'habitat (figure 160c) et les approches utilisées :

- La *procédure d'extraction* a été semi-automatique dans les cas de surfaces de bâti dense. L'approche convient mieux à l'extraction de surfaces bâties, plutôt qu'à la détection d'unités isolées. A une échelle plus petite, cette méthode est aussi bien adaptée à la délimitation des taches urbaines.

- Une *approche automatique* a été employée dans le cas de bâti dispersé en zone humide. Le résultat d'extraction est surprenant. La zone humide dans laquelle se trouve l'habitat dispersé permet de rendre plus visibles les éléments bâtis sur le plan radiométrique et par conséquent d'automatiser la méthode. Les éléments externes, comme les cultures, les zones humides ou désertiques à proximité, ne perturbent pas le processus d'extraction.

Pour les images de *Google Earth* en dehors du territoire français, la comparaison et la validation des résultats ne peuvent pas se faire par rapport à une référence comme *Géoportail* puisqu'elle est absente. Dans un tel cas, les seules solutions de validation sont la comparaison visuelle des résultats avec l'image source et la reconnaissance sur le terrain (figure 160).

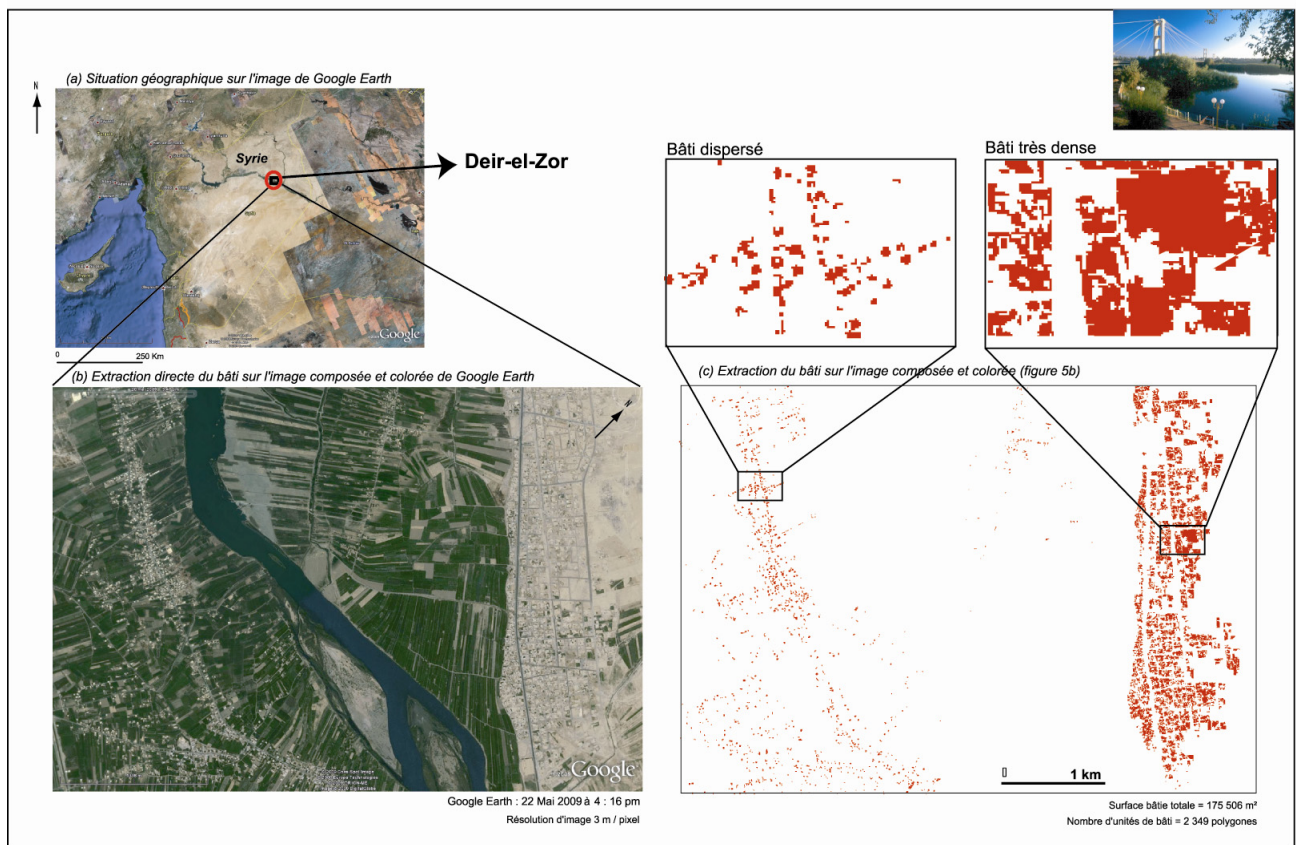


Figure 160. Extraction du bâti sur la commune Dier-el-Zor (Syrie) (H. Alawad, 2010)

Conclusion

La relative facilité d'utilisation des données *vecteur* dans un SIG montre l'intérêt de recourir à ce type d'approche pour l'analyse d'images numériques, en particulier pour extraire et construire des bases de données géographiques. La vectorisation d'image est une option qui existe dans une majorité de logiciels de type SIG. Cette opération permet en particulier, dans une seconde phase de l'analyse, d'appliquer certains outils d'analyse spatiale sur les données d'images vectorisées. Les fonctionnalités logicielles permettent de traiter et d'analyser l'image d'une façon relativement simple et rapide. La relativité et la rapidité des résultats sont liées à la cible de l'extraction et aux qualités spectrales et spatiales de l'image.

La qualité de l'extraction automatique des données géographiques d'une image est également conditionnée par le degré d'homogénéité de l'espace et par l'échelle spatiale d'application. Une image de bonne résolution spatiale, une bonne homogénéité de l'espace ainsi qu'une échelle bien adaptée à la cible sont les conditions permettant d'appliquer une approche automatique avec de bons résultats.

Les étapes suivies pour l'application de cette nouvelle méthode d'extraction des données du bâti à partir d'une image numérique (*Google Earth*) ont été réalisées sous un logiciel de cartographie sans passer par un outil spécifique de télédétection.

ELEMENTS DE REFLEXION ET PISTES DE RECHERCHE

**Quelle combinaison entre SIG et PAIO pour construire des bases
de données géographiques ?**

Malgré l'existence d'une source des images en accès libre comme *Google Earth* qui permet de consulter les images du monde entier et la possibilité d'avoir des applications à différentes échelles spatiales pour l'étude d'une grande diversité de thèmes, cette approche reste limitée aux objectifs de l'extraction. *Google Earth* fournit des images à différentes résolutions spatiales. La qualité de cette résolution d'image est liée à la plate-forme et à la technique du capteur. Les effets modificateurs des signatures spectrales, les conditions atmosphériques et les corrections géométriques sont par ailleurs des éléments indispensables à prendre en compte pendant la démarche. Les méthodes les plus courantes d'extraction de données à partir d'images numériques sont basées sur la technique de photo-interprétation. Cette technique peut être appliquée aux images de *Google Earth* qui ont une bonne qualité visuelle et une très haute résolution spatiale (TRS), mais cette qualité reste variable selon les localisations géographiques.

La qualité spectrale de l'image définit d'une façon directe le but de l'extraction. Travailler à une petite échelle spatiale diminue l'importance d'avoir une bonne résolution spatiale. Il suffit que le phénomène observé au sein de l'image soit visible d'une manière globale et de ne pas avoir besoin de détails. La détermination d'une résolution spatiale optimale dans un objectif d'analyse donné reste une notion très relative et dépend d'éléments très variés. D'après Lhomme (2005), la résolution spatiale optimale se situe dans une fourchette allant de 5 à 30 mètres pour des analyses intra-urbaines ne nécessitant pas l'identification des objets. Par contre, si l'on considère l'analyse individuelle des objets urbains, « *la résolution spatiale optimale se situe entre 0,8 et 15 mètres* » (Lhomme, 2005). Il ressort également de cette analyse qu'il n'existe pas de résolution « *spatiale adaptée à l'ensemble des objets urbains* » (Lhomme, 2005). Cette dernière remarque est d'autant plus exacte qu'il existe des variations dans la taille des objets à l'intérieur d'une même ville et entre les types de villes.

La bonne résolution spatiale de l'image est une condition indispensable pour une extraction à grande échelle et pour obtenir les éléments constitutifs du thème. Le choix de l'image joue donc un rôle déterminant dans une telle approche. Les paramètres de ce choix sont l'échelle permanente et la résolution spatiale optimale adaptée à l'objectif de l'extraction (figure 161).

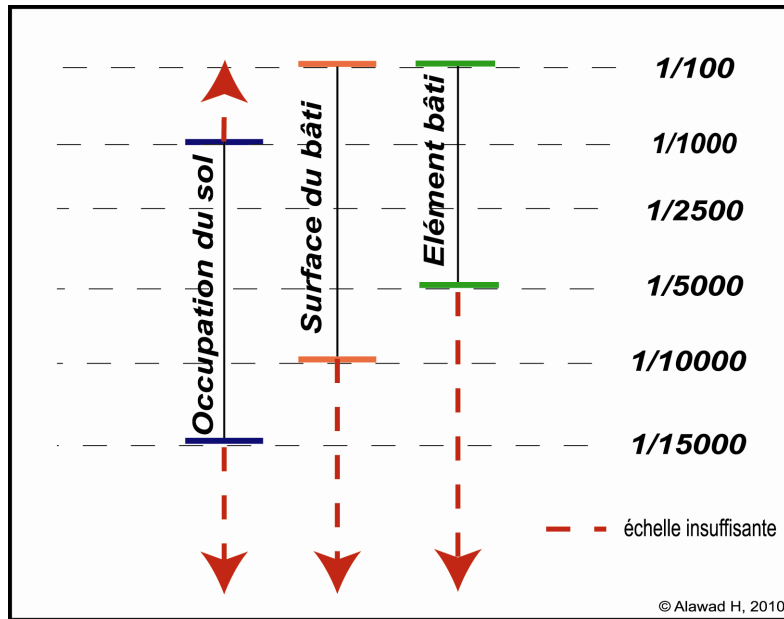


Figure 161. Pertinence des échelles géographiques selon l'objectif de l'application

L'avantage de travailler avec les images de *Google Earth* réside dans le fait qu'elles sont déjà interprétées et corrigées au niveau géométrique, radiométrique et même topographique, avec une marge de décalage assez variable selon la zone géographique représentée et la qualité de la méthode de capture de l'image. Ce décalage est plus ou moins important en fonction de l'objectif d'extraction. Dans notre application, le décalage montre un écart de 20 m à 50 m avec les données de l'IGN. Les images sont captées par des plateformes différentes avant d'être diffusées par *Google Earth*.

L'application de la méthode n'est pas valable à l'échelle de la ville pour extraire les unités de bâti à cause de la difficulté à cerner les contours des éléments bâtis. La concentration du bâti à petite échelle spatiale (cas d'une tache urbaine) ne permet pas de rendre visible les contours de chaque unité bâtie. Dans cette optique, il apparaît indispensable de choisir l'échelle spatiale qui correspond au but de l'interprétation de l'image (l'objet d'extraction). La méthode d'extraction adaptée à l'échelle d'une ville consiste à découper l'espace de cette ville en plusieurs clichés. Le fait d'appliquer la méthode d'extraction morceau par morceau, avant de fusionner les résultats obtenus, permet d'obtenir la totalité du bâti de la ville. Cette méthode offre par ailleurs la possibilité de détecter du bâti rural dispersé ou encore du périurbain très diffus. La forme de répartition du bâti dans l'espace, les matériaux de construction, l'heure des prises de vue des photos permettent de rendre visible la cible sur l'image.

Contrairement à *Géoportail* qui se présente comme un site Web, *Google Earth* est un logiciel à télécharger par Internet. Comme *Google Earth*, *Géoportail* possède une version 2D accessible en ligne *via* une interface Web (équivalent à Google Maps), et une version 3D depuis l'été 2007 pour laquelle il faut installer un logiciel sur le poste de l'utilisateur, ce qui a toutefois l'avantage de permettre une navigation plus fluide avec une connexion haut-débit (comme pour *Google Earth*).

Géoportail est accessible *via* une interface web plus statique qui souffre d'une incompatibilité avec certains anciens navigateurs comme les vieux *Opera* ou *Internet Explorer* antérieur à la version 6.0. Il est possible de créer des marques-pages pour mémoriser ses recherches à travers l'utilisation de « lieux favoris » du contexte géographique actuel. Les deux sources d'images ne répondent pas aux mêmes objectifs. *Google Earth* permet de naviguer sur l'ensemble de la terre ou d'ajouter des « épingles communautaires ». *Géoportail* a pour but, à terme, de mettre à disposition l'ensemble des données de territoire français ayant un rapport avec une carte : les photos aériennes, mais aussi les cartes de l'IGN à toutes les échelles, les zones inondables, les zones à risque d'avalanches, les données de l'INSEE sur les communes, les extraits vidéos de l'INA replacés sur leur lieu de tournage etc. (figure 162).

Critères	Géoportail	Google Earth
Échelle de travail	Nationale (France)	Mondiale
Accès aux images	Site web	Logiciel à télécharger (gratuit)
Type d'image	Image aérienne	Image satellitaire
Résolution d'image	Toujours bonne (1 pixel = 50 cm)	Variable (TB, B, M, mauvais)
Traitement avec Arc-Gis	Oui	Oui
Échelle de travail pour le même résultat d'extraction	Grande (1/16 000e)	Petite (1/5 000e)
Affichage des coordonnées géographiques et de l'échelle	Oui	Oui
Date de capture d'image	Récente 2001-2007	Très récente 2008-2009
Zoom maximum	50 m	3 m

Figure 162. Principales caractéristiques des images de *Google Earth* et de *Géoportail*

En outre, les photos satellitaires de *Google Earth* et de *Géoportail* se différencient par le fait que les premières offrent une qualité inégale (résolution et couleurs) pour le monde entier, alors que celles de *Géoportail* offrent partout en France les mêmes résolutions (50 cm)

et des couleurs naturelles, mais pour la France uniquement. Là où *Google Earth* n'utilise que des photos satellitaires, la résolution des images est limitée, contrairement aux photos aériennes de l'IGN qui sont plus précises. Cependant, pour les principales agglomérations, *Google Earth* utilise également des photos aériennes, bien plus précises cette fois que sur le site interministériel français (figure 163).

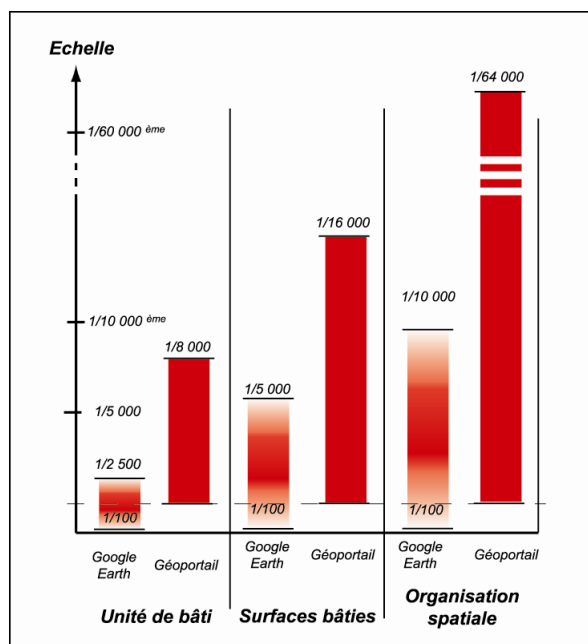


Figure 163. Echelle pertinente d'application selon deux sources d'images

En novembre 2006, *Le Figaro* a révélé que les photos de l'IGN étaient déformées par rapport aux originales, et de moins bonne qualité que celles présentées sur le site des *Pages jaunes* : ainsi des bâtiments droits présentent des courbures sur *Géoportail*. La *Direction générale de la modernisation de l'État* (DGME) a demandé à ce que la version 2 de *Géoportail* ne soit plus bridée ainsi.

En pratique, en juin 2006, *Géoportail* offrait une précision (1 / 30 000) moindre que les *Pages jaunes* (qui contiennent également des données de l'IGN), mais il offre une interface plus sophistiquée que les *Pages jaunes* ou *Google Earth*. Il est notamment possible de rechercher des villes et villages et de superposer des calques de relief, de routes et de vues aériennes, en réglant le niveau de transparence des calques.

CONCLUSION DE LA PARTIE 2

Beaucoup de recherches scientifiques en général et géographiques en particulier dépendent de la disponibilité de bases de données. L'absence de données reste toujours une difficulté majeure. Beaucoup d'Etats restreignent les accès aux données et interdisent leur diffusion, car ils les considèrent comme des informations stratégiques ou confidentielles. La méthode d'extraction de données d'images en accès libre permet de répondre à ce besoin scientifique. L'accessibilité aux images par Internet, la facilité d'appliquer cette méthodologie (expérience technique) et la rapidité d'obtention des résultats répondent à notre objectif.

La sensibilité de l'image dépend de conditions de fabrication qui font de chaque image un cas particulier. La qualité qui en résulte dépend ainsi du moment de la fabrication et de la méthode avec laquelle l'image a été captée, de la qualité de son enregistrement (en fonction des plates-formes), des saisons et même de l'heure ou de l'angle de la prise de vue..., tous ces éléments peuvent modifier la vision et la structure de l'image et donc son contraste. Des conditions favorables de fabrication permettent d'avoir une image de bonne qualité visuelle et spectrale, de sorte que le traitement et l'analyse puissent convenir à un large choix de méthodes en télédétection. Il est indispensable d'adopter une démarche de recherche de bonne qualité visuelle de l'image en raison de l'existence de déformations géométriques, de déformations atmosphériques, ou des deux ensembles au sein d'une image donnée.

Le choix d'une cible à extraire dans une image numérique dépend de son degré de visibilité dans cette image. Plus l'objet est visible et bien défini sur l'image, plus le processus d'extraction est fructueux. Par ailleurs, la bonne connaissance de la nature physique et topographique du thème ou de la cible d'intérêt est aussi une exigence dans cette procédure d'extraction. La forme de distribution spatiale, les matériaux et le mode de construction de l'objet bâti sont des éléments essentiels en analyse d'image et une bonne connaissance de terrain la facilitera.

La bonne résolution spatiale et la bonne qualité visuelle des images *Google Earth* donnent une valeur considérable à cette source. De plus, l'accès aux images du monde entier par *Google Earth* ouvre beaucoup de nouveaux terrains d'étude possibles. Ces images constituent une base de données exploitables par les techniques d'analyse d'image, comme la photo-interprétation.

La visibilité de la cible au sein d'une image est liée directement à l'échelle spatiale de l'application. Le thème de l'image, visible à une échelle spatiale donnée, ne l'est pas forcément à une autre échelle (plus grande ou plus petite).

Le but de l'interprétation d'une image numérique définit toutes les autres étapes dans la démarche de l'extraction. La qualité visuelle de l'image par rapport aux conditions géométriques et atmosphériques, sa résolution spatiale, l'échelle spatiale du travail, le choix de la bande spectrale et le choix de la méthode d'extraction, sont des éléments primaires qui peuvent être variables selon l'objectif de l'extraction. Plus la cible sur l'image est petite et l'échelle spatiale est grande, plus il est nécessaire d'avoir une haute résolution spatiale. L'extraction d'une tache urbaine à petite échelle n'exige pas d'avoir une image de très haute résolution spatiale, contrairement à une extraction de bâtiments. « *Sur les images satellitaires, la question du choix de l'échelle se pose donc en terme de choix de résolution spatiale* » (Lhomme, 2005).

L'objectif d'extraction, le choix d'image, la bande spectrale et la méthode d'extraction adaptée à l'objectif constituent ainsi les éléments du protocole approprié à l'exploitation des images numériques.

La démarche générale peut être appliquée à n'importe quel objet d'extraction, quelle que soit sa nature physique, à condition qu'il soit bien visible sur l'image. Les deux sources, *Google Earth* et *Géoportail*, fournissent des images numériques, colorées et composées, bien adaptées au traitement, malgré des caractéristiques d'image différentes.

Le critère technique le plus important dans ce genre d'application est la résolution spatiale de l'image. Plus l'espace représenté par pixel est petit, plus le résultat sera de bonne qualité et l'image plus lisible et visible. La visibilité de l'image permet de bien détecter l'objet que l'on souhaite extraire. L'intérêt de la résolution se traduit par le choix privilégié de *Géoportail* par rapport à *Google Earth*. *Géoportail* n'est pas seulement une source d'images à très bonne résolution, il fournit aussi des couches spécifiques de l'occupation du sol (IGN). Grâce aux couleurs de l'IGN qu'elles utilisent, les couches géométriques apparaissent sur les canaux de l'image dans les couleurs les plus claires. Elles permettent de supprimer la longue étape de nettoyage manuel que notre méthode a automatisée.

La bonne qualité des résultats à partir de *Géoportail* ne dispense pas de l'utilisation de *Google Earth*. En effet, *Géoportail* donne un bon résultat d'extraction grâce à sa bonne résolution spatiale, mais ne peut être utilisé que dans le cadre d'applications françaises. En revanche,

Google Earth s'impose en tant que source internationale d'images et de données, en ignorant les frontières administratives ou politiques. Dans les Etats dépourvus d'un système tel que *Géoportail*, on peut utiliser *Google Earth* via cette méthode, avec une efficacité satisfaisante au regard de l'objectif de l'application (l'objet extrait) et de la résolution de l'image obtenue, pour répondre aux besoins des utilisateurs et des recherches scientifiques.

CONCLUSION GENERALE

RAPPEL DES PRINCIPAUX RESULTATS

La diffusion des TIC constitue un champ des recherches d'autant plus vaste que les TIC ont acquis une dimension sociale considérable, qui touche la vie professionnelle, domestique, associative et culturelle. Il est indéniable que les TIC, et en particulier Internet, font maintenant partie du quotidien.

Cette thèse s'est focalisée sur deux problématiques auxquelles renvoient les deux parties. A une problématique générale d'équipement d'espaces diffus mal couverts par les TIC pour pallier des inégalités d'infrastructures numériques sur les territoires a succédé une problématique plus spécifique d'information géographique sur le repérage concret d'éléments bâtis à équiper.

La première partie a porté sur la question de la fracture numérique et en particulier de l'absence ou des insuffisances du haut débit au sein de zones blanches en France. Le recours à l'analyse spatiale par les SIG a été la réponse pour trouver des solutions à ce problème à une échelle locale. Une méthode basée sur l'analyse des champs de visibilité a été développée pour équiper des espaces jusque-là non desservis par les technologies filaires en technologie Wi-Fi. Pour le cas de la commune de La Roche-sur-le-Buis (26), elle a par exemple débouché sur une proposition de 3 scénarios.

Les inégalités de répartition d'infrastructures Internet à différentes échelles géographiques justifient d'analyser les causes de la fracture et de trouver des solutions adaptées. La première partie confirme la nécessité de coupler les TIC et les SIG pour envisager des solutions techniques aux inégalités de répartition d'un phénomène qui a des dimensions fondamentalement géographiques. L'observation de ce phénomène n'enlève pas l'intérêt d'une analyse par d'autres disciplines ou d'autres points de vue. La pertinence du point de vue économique, par exemple, apparaît dans le choix autant d'un espace en croissance démographique que de la technologie la moins coûteuse.

Plus précisément, les solutions prenant en compte la dimension économique sont le résultat de deux analyses complémentaires :

- une analyse de *scénarios de desserte* par le haut débit de l'espace étudié est proposée pour trouver une solution optimale d'un point de vue géographique, mais les solutions trouvées recouvrent une dimension économique évidente puisqu'il s'agit de minimiser les coûts d'infrastructure (ratio entre nombre d'émetteurs et unités bâties à desservir). L'articulation entre les dimensions géographique et économique est donc au cœur du raisonnement. La diffusion de réseaux non-filaires est envisagée à partir d'un point de connexion déjà existant. L'utilisation du bâti existant, parfois la nécessité de construire de nouvelles infrastructures et le choix du point d'accès principal constituent les éléments de base pour la desserte de cet espace.

- une analyse de la rentabilité de la desserte est menée en fonction du nombre d'utilisateurs à l'aide d'une méthode d'estimation de la population par unité bâtie. Ce calcul est basé sur la surface d'habitat moyenne par personne selon le type d'agglomération.

La méthode de desserte Internet non-filaire effectuée dans la première partie propose une solution technique visant à effacer la fracture numérique à une échelle locale, et par conséquent, à toutes les autres échelles. L'efficacité de la méthode est conditionnée par l'accès à des données topographiques de l'IGN et des compétences techniques pour les exploiter. Mais une réponse au besoin de données peut être aussi envisagée à partir des infrastructures TIC existantes. Les lieux déjà connectés à Internet constituent en effet les points de diffusion des réseaux non-filaires. Ces lieux constitueront plus tard les points à partir desquels sera estimée l'étendue de l'espace de desserte numérique.

La deuxième partie porte sur la recherche plus systématique de données en accès libre en l'absence de ressources de type IGN. Une application comme *Google Earth* peut fournir des bases des données d'images raster. Mais il faut traiter ces images avec des techniques de télédétection pour construire les *Géodatabases* nécessaires (sur le bâti dans le cas présent). Plus précisément, ce traitement représente une nouvelle approche de photo-interprétation. La bonne qualité spectrale et la bonne résolution spatiale des sources d'images permettent de disposer d'une base de données de qualité suffisante pour différents types d'interprétation.

Arrivée à son terme, la thèse établit ainsi les rapports entre trois champs d'étude : les TIC, les SIG et la PIAO (figure 164). L'application des techniques de télédétection, en

particulier la photo-interprétation, sur des images en accès libre comme *Google Earth* permet de répondre à un problème d'accès à des données. Ces données « images » accessibles à partir d'un outil TIC (Internet à Haut Débit) constituent la base d'une analyse spatiale dans les SIG et d'application de techniques de traitement d'images.

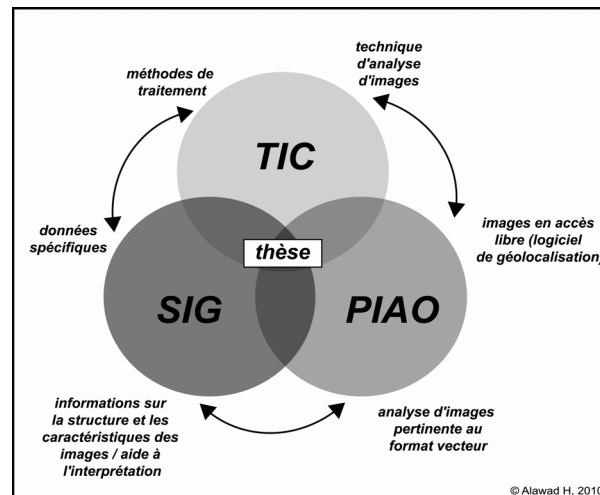


Figure 164. Interaction entre les trois outils mobilisés dans le cadre de la thèse

Cette approche par l'analyse spatiale permet d'envisager les moyens de réduire ou même de supprimer les phénomènes d'inégalités d'équipement numérique dans les territoires.

PERSPECTIVES DE RECHERCHE

La problématique de cette thèse a abordé la question des inégalités de répartition d'équipements en TIC comme un phénomène qui touche toutes les régions et échelles du monde. L'analyse a porté sur deux causes : la première est le manque d'infrastructures nécessaires pour la diffusion spatiale de services et usages liés à Internet ; la deuxième est le manque d'informations nécessaires pour effectuer une desserte souhaitable en infrastructures numériques.

La fracture numérique ne se mesure pas au nombre total de personnes connectées, mais à des écarts de la population sur d'autres indicateurs que l'accès à Internet. Il faudrait par exemple considérer des aspects économiques, sociaux ou culturels. Pour s'assurer que la fracture numérique soit effectivement réduite, on pourrait par exemple se baser sur la

réduction ou non des écarts entre différentes catégories de population pour une même variable. Ces écarts peuvent être bien sûr à l'origine d'inégalités d'accès dans une société dite de l'information. Mais les inégalités peuvent aussi être maintenues, voire renforcées par le manque d'accès aux infrastructures. Il importait donc de se pencher sur les contraintes techniques de connexion.

Le manque d'infrastructures ne constitue donc pas la seule cause de la fracture numérique. Cette thèse propose des solutions pour régler le problème du manque d'infrastructures et de données nécessaires pour réduire le problème d'inégalités numériques avec des méthodes de desserte du territoire. Les autres causes à l'origine de ce problème de fracture peuvent faire l'objet d'autres études, y compris géographiques : niveaux de formation, besoins selon les activités économiques, distribution de la population, accessibilité aux services publics.

Une autre perspective est offerte par le champ de la télédétection appliquée aux images en accès libre. A l'aide de nombreux sites et logiciels de diffusion d'images à très haute résolution spatiale, les champs d'investigation scientifique s'élargissent considérablement et permettent d'envisager de nombreuses applications.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A

- Ackermann G., Tournaire O., Mering C. (2004), « Etude de l'extension du bâti sur le littoral sénégalais à partir des paramètres texturaux de Haralick ». *Revue française de Photogrammétrie et de Télédétection* (SFPT), 173-174, 104-112.
- Ackermann G. (2007), *Etude de l'évolution du bâti sur la petite côte sénégalaise par télédétection*, Thèse de doctorat en géographie ; Université Diderot-Paris 7, 565 p.
- Adam J. (2005), « Introduire les technologies d'information et de communication dans les zones rurales des pays en développement ». *Horizons bancaires*, 326, 1-12.
- Afidegnon D., Fromard F., Bellan M.-F. (1998), « La réalité de terrain et le traitement d'image en milieu tropical anthropisé : cas des mangroves et des écosystèmes littoraux du sud du Togo vus par HRV de SPOT - Field reality and image processing in anthropogenic tropical areas : case of mangroves and coastal ecosystems of Southern Togo by HRV from SPOT ». *Actes des journées scientifiques de Sainte-Foy*. Montréal, Editions AUPELF-UREF, Canada, 1-77.
- Agba L. (2004), *Réseaux locaux sans fil, supports de développement des technologies de l'information et de la communication*. Institut de Recherche en Communications Optiques et Micro-ondes. <http://www.francophonie-durable.org/documents/colloque-ouaga-a4-contribution-agba.pdf>.
- Agba L. (2004), *Elaboration de logiciel d'aide au déploiement de réseaux sans fil millimétrique*. Thèse de doctorat en télécommunication ; Université de Limoges, 266 p.
- Alföldi T. (1996), *Introduction aux images numériques et aux techniques d'analyse numérique*. Centre canadien de télédétection, 14 p.
- Alkalifeh S. (2008), *L'apport de la télédétection dans l'observation de l'étalement urbain. L'exemple de l'agglomération d'Avignon France*. Thèse de doctorat en Géographie ; Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, 422 p.
- Aplin P., Atkinson P.-M. (1997), "Fine spatial resolution for the next decade". *International Journal of Remote Sensing*, 18, 3873-3881.
- Assako Assako R.-J. (1997), *Essai de différenciation des quartiers de Yaoundé à l'aide d'une image HRV de SPOT, Télédétection des milieux urbains et préurbains*. Editions AUPELF-UREF.
- Atkinson P.-M., Aplin P. (2004), "Spatial variation in land cover and choice of spatial resolution for remote sensing". *International Journal of Remote Sensing*, 25 (18), 3687-3702.
- ATILF (Analyse et traitement informatique de la langue française) : <http://atilf.atilf.fr/tlf.htm>, consulté le 15-09-2010.

B

- Bailly A. (2004), *Les concepts de la géographie humaine*. Paris, Editions Masson, 333 p.
- Bakis H., Eveno E. (2000), « Les géographes et la société d'information. Des effets pervers d'un champ réputé a-géographique ». *Géocarrefour*, 75 (1), 7-9.
- Bakis H. (2009), *Epistémologie de la Géographie* ; article en ligne : <http://hbgeo.over-blog.com/article-epistemologie-de-la-geographie-44274344.html>.
- Bakis H., Vidal P. (2007), « De la négation du territoire au géocyberespace : vers une approche intégrée de la relation entre Espace et TIC », in Brossaud C. et Reber R. (dir.), *Humanités numériques, Nouvelles technologies cognitives et concepts des sciences humaines et sociales*. Paris, Hermès, 101-117.
- Bakis H. (2007), « Le "Geocyberespace" revisite usages et perspectives ». *NETCOM (Networks and Communication Studies)*, 21 (3-4), 285-296.

- Baltsavias, E.-P. (2004), "Object extraction and revision by image analysis using existing geodata and knowledge: current status and steps towards operational systems." *Photogrammetry & Remote Sensing*, vol. 58, p. 129-151.
- Ballard F. (2009), *Le haut débit partout devient une réalité : Quel haut débit pour les zones isolées ? Avec quel financement ?* Lettre de l'Autorité ARCEP, 68, 11 p.
- Baret F., Houles V., Guérif M. (2007), Quantification of plant stress using remote sensing observations and crop models: the case of nitrogen management. *Journal of Experimental Botany*, 58, 869-880.
- Barnsley M.-J., Moller-Jensen L., Barr S.-L. (2001), "Inferring urban use by spatial and structural pattern recognition in urban environments", in Donnay J.-P., Barnsley M.-J., Longley P. (dir.), *Remote sensing and urban analysis*. New York, Editions Taylor and Francis, 115-144.
- Bassanesi G. (2004), *Les réseaux sans fil en réponse au problème de la fracture numérique*. Mémoire d'ingénieur. Paris, 160 p.
- Baudot Y. (1997), *L'influence de la résolution effective des données télédétectées sur les possibilités d'analyse des milieux urbains complexes. Télédétection des milieux urbains et périurbains*. Montréal, Editions AUPELF-UREF, 3-13.
- Beaude, B. (2009), *Éléments pour une géographie du lieu réticulaire*. Thèse de doctorat en géographie ; Université Paris 1-Sorbonne.
- Begué A. (2010), *Offre actuelle en télédétection satellitaire ?* Montpellier, UMR-TETIS-CEMAGREF-CIRAD-ENGREF-AgroParisTech, 1-45.
- Bellon B., Ben Youssef A., Rallet A. (2003), *La nouvelle économie en perspective*. Paris, Collection Economica, 17-24, 250 p.
- Ben-Dor, E., Levin, S. and Saaroni, H. (2001), "A spectral recognition of the urban environment using the visible and near-infrared spectral region (0,4-1,1 nm). A case study over Tel-Aviv". *International Journal of Remote Sensing*, 22 (11), 2193-2218.
- Ben Youssef A. (2004), « Les quatre dimensions de la fracture numérique ». *Réseaux*, 6 (127), 181-209.
- Ben Youssef A., Ragni L. (2008), "Uses of Educational Information and Communication Technologies: from Digital Divides to Digital Trajectories". *University and Knowledge Society Journal (RUSC)*, 5 (1), 70-82.
- Berri O., Peled A. (2006), "Spectral indices for precise agriculture monitoring". *International Journal of Remote Sensing*, 27, 2039-2047.
- Bertaud Du Chazaud H. (2003), *Dictionnaire de synonymes et mots de sens voisin*. Paris, Gallimard, 1853 p.
- Blanc Y. (2009), « Le haut débit partout devient une réalité. Quel haut débit pour les zones isolées ? Avec quel financement ? » *Lettre de l'ARCEP*, 68, 12.
- Blessigi E. (2006), *Le déploiement de la couverture numérique sur le territoire (télévision numérique de terre, téléphonie mobile, internet haut débit*, 81 p.
- Blessigi E. (2006), *2002-2007 : de la fracture numérique à la convergence des réseaux*, Rapport d'information, n°3531, Assemblée nationale, 80 p.
- Boegh E., Soegaard H., Broge N., Hasager C.-B., Jensen N.O., Schelde K., Thomsen A. (2002), "Airborne multispectral data for quantifying leaf area index, nitrogen concentration, and photosynthetic efficiency in agriculture". *Remote Sensing of Environment*, 81, 179-193.
- Bordes G. (1997), *Interprétation d'images aériennes guidée par une base de données cartographiques. Application à l'extraction automatique des routes*. Thèse en géographie; Université Marne-la-Vallée, 271 p.

Bouillot M., Delhorbe D. (2009), *SIG et Patrimoine en réseau. Usage du protocole WMS (Web-Map-Service) pour servir de la donnée géographique à des applications SIG différentes dans le cadre d'une Infrastructure de Données Spatiales*. Cité des Sciences, 6 p.

Bouredji Z. (2003), *Le Wi-Fi : réseau local sans fil*. <http://cerig.efpg.inpg.fr/Note/2003/Wi-Fi.htm>

Briquel V. (2001), « L'avancée de la périurbanisation dans les Alpes du Nord françaises et ses liens avec la croissance récente de la population ». *Revue de Géographie Alpine*, 1, 21-41.

Brunet R., Ferras R., Théry H. (1993), *Les mots de la géographie - Dictionnaire critique*. Paris, Reclus - La Documentation française, 520 p.

C

Cairncross. F. (2001), *The Death of Distance: How the Communications Revolution Is Changing Our Lives*. Harvard Business School Press, 32 p.

Cairncross. F. (2002), *The Company of the Future: How the Communications Revolution Is Changing Management*. Harvard Business School Press, 41 p.

Callot Y., Mering C., Simonin A. (1994), "Image analysis and cartography of sand hill massifs on high resolution images, Application to the Great Western Erg". *International Journal of Remote Sensing*, 15, 3799-3822.

Caloz R., Collet C. (2001), *Précis de télédétection, Volume 3 : traitements numériques d'images de télédétection*. Sainte-Foy (Québec, Canada), Presses de l'Université du Québec/AUPELF, 386 p.

Candillier C. (2006) *Méthode d'extraction de connaissances à partir de données (ECD) appliquées aux SIG*. Thèse de doctorat en informatique ; Université de Nantes, 218 p.

Cao C., Lam, S.-N. (1997), "Understanding the scale and resolution effect in remote sensing and GIS", in Quattrochi D., Goodchild M.-F., *Scale in Remote sensing and GIS*, 57-72.

Castells M. (2002), *La galaxie Internet*. Paris, Fayard, 327 p.

Centre Canadien de Télédétection - CCT (2010), site Internet : www.ccrs.nrcan.gc.ca

Cesselin G., Giordana J.-L. (2002), *Paysage périurbain : comprendre, connaître, respecter*. Rambouillet, Editions La Bergerie Nationale, 55 p.

Chaerle L., Van Der Straeten D. (2000), "Imaging techniques and the early detection of plant stress". *Trends in Plant Science*, 5, 295-500.

Cihlar J., St-Laurent L., Dyer J. (1991), "Relation between the normalized vegetation index and ecological variables". *Remote Sensing of Environment*, 35, 279-298.

Claval P. (2005), *Épistémologie de la géographie*. Paris, Editions Armand Colin, 265 p.

Coester G., Ducass A. (2007), *L'aménagement numérique du territoire*. Paris, La Documentation française, 1, 103 p.

Collet C. (1992), *Système d'information géographique en mode image*. Collection Ingénierie de l'environnement, 186 p.

Courtot R. (2008), « Une utilisation inattendue des outils de télédétection disponibles sur internet : l'identification des sujets de deux aquarelles du peintre William Turner ». *Cybergeographie : European Journal of Geography*. <http://cybergeographie.revues.org/index18582.html>

Crist E.-P., Cicone R.-C. (1984), "Application of the Tasseled Cap Concept to Simulated Thematic Mapper Data". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 50, 343-352.

Crist E.-P., Cicone R.-C. (1984), "A Physically-Based Transformation of Thematic Mapper Data-The TM Tasseled Cap", in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 22 (3), 256-263.

Crist E.-P., Kauth R.-J. (1986), "The Tasseled Cap De-Mystified". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 52 (1), 81-86.

D

Das D.-K., Mishra K.-K., Kalra N. (1993), "Assessing growth and yield of wheat using remotely-sensed canopy temperature and spectral indices". *International Journal of Remote Sensing*, 14, 3081-3092.

Davis C.-H., Schaub T. (2005), "A transboundary study of urban sprawl in the Pacific Coast region of North America: The benefits of multiple measurement methods". *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 7, 268-283.

Delenne C. (2006), *Extraction et caractérisation de vignes à partir de données de télédétection à Très Haute Résolution Spatiale*. Thèse de doctorat de l'ENGREF, en Sciences de l'environnement, mention télédétection ; UMR-TETIS-ENGREF-CEMAGREF-CIRAD, Montpellier, 172 p.

Delenne C., Durrieu S., Rabatel G., Deshayes M., Bailly J.-S., Lelong C., Couteron P. (2008), "Textural approaches for vineyard detection and characterization using very high spatial resolution remote-sensing data". *International Journal of Remote Sensing*. Volume 29, Issue 4, 1153-1167.

Delenne C., Durrieu S., Rabatel G., Deshayes M. (2006), "Frequency analysis for vineyard detection and characterization from airborne images". *Proceedings of the Fifth International Work-Shop on Information Optics* (WIO), Toledo (Spain). pp.368-376.

Desbois, H. (2009), « La transition géonumérique », in Guichard E. (ed.), *Sur les traces de Jack Goody*. Villeurbanne, Presses de l'ENSSIB.
<http://barthes.enssib.fr/articles/Desbois-colloque-ENSSIB-Goody-2008.pdf>.

Desbois, H. (2001), « Les territoires de l'internet : suggestions pour une cybergéographie », in Guichard E. (éd.), *Sur les traces de Jack Goody*. Presses de l'ENSSIB, Villeurbanne, 253-263.

Deffontaines P. (1972), *L'homme et sa maison*. Gallimard, 254 p.

Donnay J.-P., Barnsley M.-J., Longley P. (dir.) (2001), *Remote sensing and urban analysis*. New York, Editions Taylor and Francis.

Donnay J.-P., Unwin D. (2001), "Modelling geographical distributions in urban areas". *Remote Sensing and Analysis*, GISDATA 9, Taylor and Francis, 205-225.

Donnat O. (2007), *Pratiques culturelles et usages d'internet*.
<http://www2.culture.gouv.fr/deps/fr/pratiquesinternet.pdf>

Douchez M.-C. (1993), *Utilisation des concepts d'analyse statistique des données et de connexité pour la segmentation des images*. Thèse en informatique ; Université de Lille 1, 168 p.

Drouot J. (1995) – *L'étude de l'extension urbain à partir du traitement d'images satellitaires*. Mémoire de DEA, Université François Rabelais, Tours, 86 p.

Duféal M., Grasland L. (2003), « La planification des réseaux à l'épreuve de la matérialité des TIC et de l'hétérogénéité des territoires ». *Flux*, 54, 49-69.

Dupuy G. (2002), *Internet, géographie d'un réseau*. Paris, Ellipses, 138 p.

Dupuy G. (2007), *La fracture numérique*, Paris, Ellipses, Volume 1, 158 p.

Durrieu S. (2009), *Télédétection : principes de base. Les bases de la photo-interprétation*. Montpellier, UMR-TETIS-CEMAGREF-CIRAD-ENGREF-AgroParisTech, 1-55.

Durrieu S. (2010), *Télédétection : principes de base. Pré-traitements radiométriques*. Montpellier, UMR-TETIS-CEMAGREF-CIRAD-ENGREF-AgroParisTech, 1-53.

Durrieu S. (2010), *Télédétection : principes de base. Les bases du traitement d'image*. Montpellier, UMR-TETIS-CEMAGREF-CIRAD-ENGREF-AgroParisTech, 1-39.

Durrieu S. (2010), *Les bases de la télédétection*. Montpellier, UMR-TETIS-CEMAGREF-CIRAD-ENGREF-AgroParisTech, 1-51.

Duvernet J. (2007), *2010 L'Internet pour tous, 15 mesures pour réduire la fracture numérique en France*. Edition Duvernet, 1, 93 p.

E

Eberhard J.-M. (1997), « Étude des structures urbaines de l'agglomération de Mexico à l'aide d'une image HRV de SPOT », in *Télédétection des milieux urbains et périurbains*. Montréal, Éditions AUPELF-UREF, 25-34.

F

Fautrero V., Fernandez V., Puel G. (2006), « Les technologies 'alternatives' d'accès au haut débit, l'expérimentation comme lieu de jeux d'acteurs. » *Réseaux*, 3, 137, 149-172.

Fautrero V., Fernandez V., Puel G. (2007), « Les technologies alternatives à l'usage : à propos d'une expérimentation 'satellite/Wi-Fi' ». *Espaces et sociétés*, 137-152.

Feldman M.-P. (2002), « La révolution d'Internet et la géographie de l'innovation ». *Revue internationale des sciences sociales*, 171, 54-62.

Ferwerda J.-G., Skidmore A.-K., Mutanga O. (2005), "Nitrogen detection with hyperspectral normalized ratio indices accross multiple plant species". *International Journal of Remote Sensing*, 26, 4083-4095.

Forster B.-C. (1985), "An examination of some problems and solutions in monitoring urban areas from satellites platforms". *International Journal of Remote Sensing*, 6 (1), Sydney, Australie, 139-151.

Franke J., Menz G. (2007), "Multi-temporal wheat disease detection by multi-spectral". *Remote sensing Precision Agriculture*, 8, 161-172.

Froment B., Bakis H. (2005), « Migrations, télécommunications et lien social: de nouveaux rapports aux territoires? L'exemple de la communauté réunionnaise ». *Annales de Géographie*, 645, 564-574.

G

Gadal S. (2001), *L'identification des formes spatiales de métropolisation par télédétection*. Thèse de doctorat en géographie ; Université de Marseille-1, 451 p.

Gadal S. (2004), « Méthodes de reconnaissance symbolique intermédiaire pour l'identification et la représentation des formes de bâtis ». *Bulletin de la Société française de photogrammétrie et télédétection*, 173 -174, 59.

Gallice-Matti C. (2005), *La télédétection pour l'analyse spatiale, application aux espaces périurbains de la Région Urbaine de Lyon*, Thèse de doctorat en géographie et aménagement ; Université de Lyon 3, 275 p.

Girard M.C. (1999), *Traitement des données de télédétection*. Paris, Dunod, 544 p.

Gilles C., Ducass A. (2007), *L'aménagement numérique du territoire*. Paris, La Documentation française, Paris, 103 p.

Gitelson A.A., Kaufman Y.J., Merzlyak M.N. (1996), "Use of green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS". *Remote Sensing of Environment*, 58, 289-298.

- Goodchild M. (1999), "An interview with Michael Goodchild, January 6, 1998, Santa Barbara, California". *Environment and Planning, D Society and Space*, 17, 3-15.
- Goodchild M. (2000), "Cartographic Futures on a Digital Earth". *Cartographic Perspectives*, 36, 3-11.
- Goodchild M. (2006), "GIScience Ten Years After Ground Truth". *Transactions in GIS*, 687-692.
- Goodchild M. (2008), "Geographic information science: the grand challenges", in J.P. Wilson and A.S. Fotheringham (eds), *The Handbook of Geographic Information Science*. Malden (MA), Blackwell, 596-608.
- Goodchild M. (2009), "Virtual geographic environments as collective constructions", in Lin H. and M. Batty M. (eds), *Virtual Geographic Environments*. Beijing, Science Press, 15-24.
- Goodchild M. (2010), "Whose hand on the tiller? Revisiting 'Spatial Statistical Analysis and GIS' ", in Anselin L. and S.-J. Rey (eds), *Perspectives on Spatial Data Analysis*. New York, Springer, pp. 49-60.
- Grasland L., Houzet S. (2005), « Diffusion des TIC et nouvelles dynamiques territoriales en Méditerranée ». *Revue d'Economie Méridionale*, 53, 1-19.
- H**
- Haboudane D., Miller J.-R., Tremblay N., Zarco-Tejada P.-J., Dextrase L. (2002), "Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture". *Remote Sensing of Environment*, 81, 416-426.
- Hadria R., Duchemin B., Lahrouni A., Khabba S., Er-Raki S., Dedieu G., Chehbouni A G., Oliso A. (2006), "Monitoring of irrigated wheat in a semiarid climate using crop modeling and remote sensing data: Impact of satellite revisit time frequency". *International Journal of Remote Sensing*, 27, 1093-1117.
- Haddad M., Tomasi A. (1997), *Le haut débit, un enjeu pour les collectivités territoriales ?* Presses de l'Ecole des Mines de Paris, 108, 28-37.
- Henry S. (1999), « Croissance démographique à Marrakech par télédétection ». *Télédétection*, 1 (2), 71-94.
- Hemiari, A., He, D.-C. et Morin, D. (2004), « Nouvelle approche globale de l'extraction de lignes basée sur la transformée de Radon ». *Télédétection*, 4 (1), 19-37.
- Hodgen P.-J., Raun W.-R., Johnson G.-V., Teal R.-K., Freeman K.-W., Brixey K.-B., Martin K.-L., Solie J.-B., Stone M.-L. (2005), "Relationship between response indices measured in-season and at harvest in winter wheat". *Journal of Plant Nutrition*, 28, 221-235.
- Houlès V., Guérif M., Mary B. (2007), "Elaboration of a nitrogen nutrition indicator for winter wheat based on leaf area index and chlorophyll content for making nitrogen recommendations". *European Journal of Agronomy*, 27, 1-11.
- Houzet S., Grasland L. (2004), « Les dimensions spatiales de la fracture numérique en France ». *Réseaux*, 5-6 (127), 115-140.
- Hudson S., Rooks A. (2008), "The Renaissance of Geographic Information: Neogeography, Gaming and Second Life". *UCL Working Papers*, 142, Centre for Advanced Spatial Analysis University College London, 1-16.
- Huete A.R. (1998), "A soil-adjusted vegetation index SAVI". *Remote Sensing of Environment*, 25, 295-309.

J

- Jauvin R. (2003), *Déploiement Hotspots Wi-Fi*. Paris Open Network Rapport technique, 9 p.
- Jean Y., Calenge Ch. (1997), « Espaces périurbains au-delà de la ville et de la campagne ». *Annales de géographie*, 596, 389-413.
- Jensen, J.R. (2000), *Remote sensing of the environment: An earth resource perspective*. Upper Saddle River (NJ), Prentice Hall, 544 p.
- Jensen J.-R., Qiu F., Patterson K. (2001), "A Neuronal Network Image Interpretation System to Extract Rural and Urban Land Use and Land Cover Information from Remote Sensor Data". *Geocarto International - A Multidisciplinary Journal of Remote Sensing and GIS*, 16 (1), pp. 19-28.
- Jonas O. (2005), *Les impacts réels, virtuels et paradoxaux des technologies de l'information et de la communication sur l'espace et les territoires*. Paris-La Défense : METLTM-DRAST Dossiers Techniques, Territoires et Sociétés, 37, 13-37.
- Jonas O. (2005), *Villes numériques. Enjeux et problématiques*. Paris-La Défense : METLTM-DRAST, Dossiers Techniques, Territoires et Sociétés, 37, 187-207.

K

- Kalika M. (2006), *Management et TIC*. Paris, Edition Liaisons, 255 p.
- Kauth R.-J., Thomas G.-S. (1976), "The tasseled Cap - A Graphic Description of the Spectral-Temporal Development of Agricultural Crops as Seen by LANDSAT". *Proceedings of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data*, Purdue University of West Lafayette (Indiana), 4-41.
- Kergomard C. (2003), *La télédétection aéro-spatiale : une introduction*.
<http://www.geographie.ens.fr/IMG/file/kergomard/Teledetection/CTeledetection.pdf>

L

- Labbé S. (2009), *Télédétection : principes de base. Résolutions spatiales, spectrales et temporelles*. Montpellier, UMR-TETIS-CEMAGREF-CIRAD-ENGREF-AgroParisTech, 1-44.
- Labbé S. (2010), *Télédétection : principes de base. Traitements géométriques*. Montpellier, UMR-TETIS-CEMAGREF-CIRAD-ENGREF-AgroParisTech, 1-36.
- Labbé S. (2006), *Les SIG : un outil pour une vision durable et cohérente des territoires*.
<http://www.sig-la-lettre.com/pdf/doc-88.pdf>
- Lee, K.-H., R.-S. Lunetta, (1995), "Wetland Detection Methods", in Lyon J.-C and McCarthy J. (eds) *Wetland and Environmental Applications of GIS*. CRC Press Inc. Boca Raton, Florida, 373 p.
- Lefèvre S., Mercier L., Tiberghien V., Vincent N. (2002), "Multiresolution color image segmentation applied to background extraction in outdoor images", *IS&T European Conference on Color in Graphics, Image and Vision*; Poitiers, 363-367.
- Lefèvre S. (2009), *Approches multivaluées et supervisées en morphologie mathématique et applications en analyse d'image*. Mémoire d'HDR, Université de Strasbourg, 238 p.
- Létourneau, G., M. Jean. (1996), *Cartographie des marais, marécages et herbiers aquatiques le long du Saint-Laurent par télédétection aéroportée*. Centre Saint-Laurent, Conservation de l'environnement ; Environnement Canada, Région du Québec, 101 p.

Lelong C., Pinet P., Poilvé H. (1998), "Hyperspectral imaging and stress mapping in agriculture: a case study on wheat in Beauce (France)". *Remote Sensing of Environment*, 66, 179-191.

Lhomme S. (2005), *Identification du bâti à partir d'images satellitaire à très haute résolution spatiale*. Thèse de doctorat en géographie. Université Louis Pasteur 1, Strasbourg, 279 p.

Lhomme S., He D.-C., Morin D. (2003), « Evaluation de la qualité d'une image Ikonos pour l'extraction du bâti en milieu urbain ». *Télédétection*, 3 (5), 457-466.

Lhomme S., Weber C., He D.C. (2004), « L'extraction du bâti à partir d'images satellitaires T.H.R.S ». *Revue Internationale de Géomatique*, 14 (3-4), 465-484.

Lombard D. (2008), *Le village numérique mondial, la deuxième vie des réseaux*. Paris, Odile Jacob, 231 p.

Loukou A.F. (2009), « Les TIC et l'attractivité dynamique des territoires dans la problématique du développement local en Afrique ». Publications IRD. <http://www.tic.ird.fr/spip.php.article321>

M

Martinuzzia S., William A.G., Ramos Gonzaleza O.M (2007), "Land development, land use, and urban sprawl in Puerto Rico integrating remote sensing and population census data". *Landscape and Urban Planning*, 79, 288-297.

Mayer, H. (1999), "Automatic object extraction from aerial imagery - A survey focusing on Buildings". *Computer Vision and Image Understanding*, 74 (2), 138- 149.

Merenne-Schoumaker B. (1996), *La localisation des services*. Paris, Nathan, 190 p.

Mering C., Chopin F. (2002), "Granulometric maps from high resolution satellite images". *Image Anal Stereol*, Editor, 21, 19-24.

Mering C. (2001), *Géographie et observation par satellite*. Paris. Conférence à l'Université de tous les savoirs, 1h18.

O

Osborne S.-L., Schepers J.-S., Schlemmer M.-R. (2004), "Detecting nitrogen and phosphorus stress in corn using multispectral imager". *Soil Science and Plant Analysis*, 35, 505-516.

P

Palmann C. (2009), *Recalage d'images de télédétection. Approche par transformée de Hough*, 1-17. <http://www.lsis.org/adddl/fr/manifs/jdl609/ressources/articles/08.pdf>

Paul S., Depecker L., Goillot C., Lenco M. (1991), *Introduction à l'étude de la télédétection aérospatiale et de son vocabulaire*. Paris, Direction Générale de l'Enseignement Supérieur, 316 p.

Pesaresi M., Bianchin A. (2001), "Recognizing settlement structure using mathematical morphology and image texture", in Donnay J.-P., Barnsley M.-J., Longley P. (dir.), *Remote sensing and urban analysis*. New York, Editions Taylor and Francis, 55-68.

Poncet P., Ripert B. (2004), « L'espace fracturé : pour une pensée géographique de la fracture numérique ». *Colloque international 18-19 novembre TIC et inégalité : les fractures numériques, maps designers*, 1-18.

Pouyllau S. (2008), *KML simple et géodonnées*.

Article en ligne : <http://blog.stephanepouyllau.org/kml-simple-et-geodonnees-partie-1/>

Puissant A., Weber C. (2001), "The use of image in geographical information market: results of an inquiry on the needs of end-users in urban studies". Actes du *7th Workshop GI & GIS, EGII- Managing the Mosaic*, Potsdam, 13-15 June, 23 p.

Puissant A. (2003), *Information géographique et image à très haute résolution*. Thèse de Doctorat en géographie ; Université Louis Pasteur de Strasbourg, 445 p.

Puissant A., Weber C. (2004), « Vers une démarche orientée-objets pour extraire les objets urbains sur des images THR ». *Bulletin de la Société française de photogrammétrie et télédétection*, 173 -174, 123-134.

Puel G., Ullmann C. (2006), « Les nœuds et les liens du réseau Internet : approche géographique, économique et technique ». *L'Espace géographique*, 2, 97-114.

Puel G., Vidal M. (2004), *Les lieux d'accès à Internet en Midi-Pyrénées*. Rapport interne, Université de Toulouse-Le Mirail, 154 p.

R

Rallet, A. (2001), « Du commerce électronique à l'électronisation du commerce ». *Réseaux*, 106, 19-72.

Rallet A. (2003), « Nouvelle économie et commerce électronique : mesure et démesure ». *Annales des télécommunications*, 58 (1-2), 147-166.

Rallet A., Rochelandet F. (2004), « La fracture numérique : une faille sans fondement ? ». *Réseaux*, 127, 19-54.

Rallet A., Ullmann C. (2007), *Le Haut Débit, nouveau défi du développement local : approches croisées de l'économie et de la géographie*. Colloque de l'ASRDLF, Dijon, 5, 6 et 7 septembre.

Reyniers M., Vrindts E., DeBaerdemaeker J. (2006), "Comparison of an aerial-based system and an on the ground continuous measuring device to predict yield of winter wheat". *European Journal of Agronomy*, 34, 87-94.

Rimbert S. (1995), *Géographie et cartographie. Encyclopédie de géographie*, Paris, Economica, 141 p.

Robin M. (1995), *La télédétection*. Editions Nathan, Paris, 318 p.

Robin M. (1999, 2002), *La télédétection : des satellites aux systèmes d'information géographiques*. Paris, Nathan, 219 p.

Rolland-May C. (2004), « Introduction : Le Grand Est, lecture géographique d'un espace en émergence ». *Revue Géographique de l'Est*, 44 (3-4). <http://rge.revues.org/617>

Rondeaux G., Steven M., Baret F. (1996), "Optimization of soil-adjusted vegetation indices". *Remote Sensing of Environment*, 55, 95-107.

S

Savy M. (1998), « TIC et territoire : le paradoxe de localisation ». *Les Cahiers Scientifiques du Transport*, 33, 129-146.

Savy M. (1999), *TIC et Territoire : Technologies de l'information et de la communication et performances économiques*. Paris, Editions du Commissariat Général du Plan, 368 p.

Savy M. (2005). « Transport et territoire, télécommunications et territoire : une lecture parallèle », in DRAST (éd.), *Des TIC et des territoires*. Paris, Ministère des transports, de l'équipement, du tourisme et de la mer Collection Techniques, territoires et société, 37, 43-50.

Seelan S.-K., Laguet S., Casady G.-M., Seielstad G.-A. (2003), "Remote sensing applications for precision agriculture: a learning community approach". *Remote Sensing of Environment*, 88, 157-169.

Sims D.-A., Gamon J.-A. (2002), "The relationships between leaf pigment content and spectral reflectance accross a wide range of species, leaf structures and development stage". *Remote Sensing of Environment*, 81, 337-354.

Soulié N. (2006), « Technologies de l'Information et de la Communication et dynamiques des espaces ruraux : le cas de la région Midi-Pyrénées ». *Revue d'économie régionale et urbaine*, 4, 531-550

Stenberg B., Jonsson A., Borjesson T. (2005), "Use of near infrared reflectance spectroscopy to predict nitrogen uptake by winter wheat within fields with high variability in organic matter". *Plant and Soil*, 269, 251-258.

Stone M.-L., Solie J.-B., Raun W.-R., Whitney R.-W., Taylor S.-L., Ringer J.-D. (1996), "Use of spectral radiance for correcting in-season fertilizer nitrogen deficiencies in winter wheat". *Transactions of the ASAE*, 39, 1623-1631.

T

Terretaz P., Collet C. (1997), « Différenciation des tissus résidentiels à l'aide de l'indice PVI, de la morphologie mathématique et du filtrage contextuel : exemple de Genève (Suisse) ». *Actes du colloque Télédétection des milieux urbains et périurbains*, Liège 2-5 octobre 1995. Liège, Éditions AUPELF-UREF, 123 -131.

Terretaz P. (1998), *Délimitations des agglomérations et segmentation urbaine à l'aide d'images satellitaires SPOT HRV, Application aux villes de Genève, Strasbourg et Liège*. Thèse de doctorat en géographie ; Université de Fribourg (Suisse), 211 p.

Thenkabail P.S., Smith R.B., Pauw E. (2000), "Hyperspectral vegetation indices and their relationship with agricultural growth characteristics". *Remote Sensing of Environment*, 71, 158-182.

Thomas I. (2008), "Google Earth, mappemonde virtuelle", in *Google, to be or not to be*. Louvain 175, 34 35. http://www.uclouvain.be/cps/ucl/doc/adcp/documents/Louv175_part2.pdf

Tucker C.-J. (1979), "Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation". *Remote Sensing of Environment*, 8, 127-150.

Tsai, Y. -H. (2005), "Quantifying urban form: compactness versus 'sprawl". *Urban S.tudies*, 42 (1), 141-161.

V

Valenduc G., Vendramin P. (2006), *Fractures numériques, inégalités sociales et processus d'appropriation des innovations* ». <http://irene.asso.free.fr/digitaldivides/papers/vendramin.pdf>

VanVuuren J.-A., Meyer J.-H., Claassens A.-S. (2006), "Potential use of near infrared reflectance monitoring in precision agriculture". *Soil Science and Plant Analysis*, 37, 3171-2184.

Vodoz L., Reinhard M. (2004), « Les paradoxes territoriaux de la fracture numérique ». *Actes du Colloque « TIC et inégalités : les fractures numériques »*. Communauté d'études pour l'aménagement du territoire (C.E.A.T.), Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), Paris, 18-19 novembre, 1-14. <http://ceat.epfl.ch>

W

Weber C. (1995), *Images satellitaires et milieu urbain*. Paris, Hermès, 185 p.

Weber C. (2001), "Urban agglomeration delimitation using Remote sensing data", in Donnay J.-P., Barnsley M.-J., Longley P. (dir.), *Remote sensing and urban analysis*. New York, Editions Taylor and Francis, 145-159.

Weber C., Donnay J.P., Collet C. (1997), « Reconnaissance des formes : transfert méthodologique Nord-Sud », in *Télédétection des milieux urbains et périurbains, Actes du colloque Télédétection des milieux urbains et périurbains*, Liège 2-5 octobre 1995. Liège, Éditions AUPELF-UREF, 133-144.

Weber C., Hirsch J., Diebold F. (1990), « Mutations urbaines : analyses des changements à partir de deux images SPOT (1986-1989) ». *Photo Interprétation*, 6, 39-45.

Weber C., Hirsch J., Serradj A. (1997), « Pour une autre approche de la délimitation urbaine : application à Strasbourg (France), *Actes du colloque Télédétection des milieux urbains et périurbains*, Liège 2-5 octobre 1995. Liège, Éditions AUPELF-UREF, 225-237.

Weber C., Petropoulou C. (1995), Etude diachronique d'une région périurbaine à partir de données satellitaires : le cas de la plaine d'Eleusis (Grèce), in *Télédétection et systèmes d'information urbains, Collection Anthropos*. Paris, Anthropos, Collection Villes, 255-268.

Welch R. (1982), "Spatial resolution requirements for urban studies". *International Journal of Remote Sensing*, 3 (2), 139-146.

Wenjiang H., Jihua W., Zhijie W., Jiang Z., Liangyun L., Jindi W. (2004), "Inversion of foliar biochemical parameters at various physiological stages and grain quality indicators of winter wheat with canopy reflectance". *International Journal of Remote Sensing*, 25, 2409-2419.

Wilmet J. (1996), *Télédétection aérospatiale: Méthodes et applications*. Paris, SIDES, 300 p.

Wilmet J. (1996), *Utilisation du sol urbain et périurbain in Bonn, Précis de télédétection, vol. 3 : application*. Sainte Foy, Presse universitaire du Québec, 478-532.

Wheeler D.L. (2004), *Internet dans le monde arabe*. Présentation à la conférence annuelle de la Middle East Studies, Association of North America, Washington, 22 novembre.

Woodcock C.E., Strahler A.H. (1987), "The factor scale in remote sensing". *Remote Sensing of Environment*, 21, 311-332.

Z

Zhao D.-G., Li J.-L., Qi J.-G. (2005), "Identification of red and NIR spectral regions and vegetative indices for discrimination of cotton nitrogen stress and growth stage". *Computers and Electronics in Agriculture*, 48, 155-169.

Sites Internet consultés

www.unctad.org (site CNUCED, conférence des nations unies sur le commerce et le développement) 2006.

www.insee.fr

www.ign.fr

www.esri.com

www.geoportail.fr

www.googleearth.com

www.teledetection.fr

www.territoires.gouv.fr

www.ant.developpement-durable.gouv.fr

www.ccrs.nrcan.gc.ca

www.mediametrie.fr

www.trop.uha.fr/master/IMG/pdf/Cours3_M1_Traitement_d_images.pdf

www.geoimage.fr/index.php?option=com_content&task=blogcategory&id=37&Itemid=64

www.tecdev.fr

TABLE DES FIGURES ET TABLE DES MATIERES

Table des figures

FIGURE 1 : LA FRACTURE NUMERIQUE SOUS HUIT ANGLES DE VUE	9
FIGURE 2 : PROCESSUS DE DIFFUSION DE L'ACCES A INTERNET ET NATURE DE LA FRACTURE NUMERIQUE AU COURS DU TEMPS (VALENDUC, 2004).....	10
FIGURE 3. TECHNOLOGIES D'ACCES AU HAUT DEBIT ET COUVERTURE GEOGRAPHIQUE (TACTIS, 2006)	11
FIGURE 4. EXEMPLE DE RESEAUX DE COMMUNICATION DANS LE DEPARTEMENT DE LA DROME	29
FIGURE 5. OPERATEURS TELECOMS DANS LE MONDE (WWW.GEOIMAGE.FR).....	34
FIGURE 6. PAYS EXERÇANT DES CONTROLES POLITIQUES OU RELIGIEUX SUR LES CONTENUS ET LA NAVIGATION SUR LE WEB (DUPUY, 2002)	35
FIGURE 7. POURCENTAGE DE CROISSANCE DU NOMBRE DES INTERNAUTES DANS LE MONDE ENTRE 2000 ET 2009 (INTERNET WORLD STAT, 2009).....	36
FIGURE 8. DEPENSES EN TIC DANS LE MONDE (IDATE, 2009)	37
FIGURE 9. POURCENTAGE DE LA PENETRATION D'INTERNET DANS QUELQUES PAYS MEDITERRANEENS PAR RAPPORT LEUR POPULATION TOTALE EN 2009 (IWS INTERNET WORLD STAT, 2009).....	38
FIGURE 10. NOMBRE D'INTERNAUTES EN FRANCE (JOURNAL DU NET, 2009)	39
FIGURE 11. PARC D'ACCES A INTERNET (ARCEP, 2010).....	40
FIGURE 12. TAUX DE PERSONNES DISPOSANT D'UN ACCES INTERNET HAUT DEBIT A LEUR DOMICILE EN FRANCE (CREDOC, 2008)	40
FIGURE 13. PERCEPTION D'UNE PRIVATION D'INTERNET DANS LES PAYS DEVELOPPES	41
FIGURE 14. DIVERSITE DES TECHNOLOGIES EN FONCTION DE LA DENSITE ET DE L'ELOIGNEMENT (ADAM, 2005) ..	42
FIGURE 15. COUVERTURE DU TERRITOIRE FRANÇAIS PAR LE DSL AU 31 DECEMBRE 2009 (ARCEP, 2010)	46
FIGURE 16. EVOLUTION DES INEGALITES D'EQUIPEMENT DEMESUREE PAR LE COEFFICIENT DE GINI (EN %).....	47
FIGURE 17. TAUX DE COUVERTURE PAR L'ADSL PAR DEPARTEMENT (FT, 2006).....	50
FIGURE 18. TECHNOLOGIES DE COLLECTE ET DE DESSERTE (IDATE, 2006)	51
FIGURE 19. CARACTERISTIQUES DE DESSERTE OU DE COLLECTE SELON LES TECHNOLOGIES.	51
FIGURE 20. REPARTITION DES NRA PAR CLASSE DE NOMBRE DE LIGNES (ARIASE, 2010)	53
FIGURE 21. NOMBRE DE NRA SELON LA NATURE URBAINE OU RURALE DES COMMUNES DE LA DROME.	54
FIGURE 22. TAUX D'ELIGIBILITE A AU MOINS UNE OFFRE ADSL DE FRANCE TELECOM	56
FIGURE 23. MODES DE CONNEXION A HAUT DEBIT CHEZ LES PARTICULIERS (EN %) (CREDOC, 2008).....	57
FIGURE 24. SCHEMA DE FONCTION DE L'ADSL (FRANCE TELECOM, 2008)	58
FIGURE 25. LE DISPOSITIF TECHNIQUE DE DEGROUPEMENT (FRANCE TELECOM, 2008)	59
FIGURE 26. DEBIT DESCENDANT EN FONCTION DE LA LONGUEUR DE LIGNE EN FIBRE OPTIQUE (FT, 2008)	60
FIGURE 27. EVOLUTION DU NOMBRE D'ABONNEMENTS A UN SERVICE DE TELEVISION SUR DSL (ARCEP, 2010) ..	61
FIGURE 28. MARCHE DE LA FIBRE OPTIQUE DANS LE MONDE (IDATE, 2009)	62
FIGURE 29. DEBIT THEORIQUE DU WI-FI ET SA PORTEE, A L'EXTERIEUR OU EN INTERIEUR (DIACONESCO, 2008) ..	65
FIGURE 30. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU WI-FI.....	65
FIGURE 31. DEUX MODES DE DEPLOIEMENT DE LA TECHNOLOGIE DE WI-FI (ANT, 2007)	66
FIGURE 33. NOMBRE D'ABONNES AU TELEPHONE MOBILE DANS LE MONDE (IDATE, 2009)	70
FIGURE 34. MARCHE DE LA TELEPHONIE MOBILE EN FRANCE (ARCEP, 2010).....	71
FIGURE 35. NOMBRE DE MOBINAUTES (ARCEP, 2010).....	72
FIGURE 36. COMPARAISON ECONOMIQUE DES DEPLOIEMENTS ETHERNET FILAIRE V.S. SANS FIL (JAUVIN, 2003) .	73
FIGURE 37. PROFILS ET POURCENTAGES DES UTILISATEURS D'INTERNET EN FRANCE (CREDOC, 2008).....	75
FIGURE 38. PROFILS ET POURCENTAGES DES UTILISATEURS D'INTERNET EN FRANCE (CREDOC, 2009)	76
FIGURE 39. MULTIPLICATION DES SERVICES SUR INTERNET (CREDOC, 2009)	77
FIGURE 40. MOUVEMENTS DEMOGRAPHIQUES DU DEPARTEMENT DE LA DROME AU NIVEAU COMMUNAL	84
FIGURE 41. LES COMMUNES DROMOISES A EVOLUTION DEMOGRAPHIQUE POSITIVE ENTRE 1982 ET 1990 ET ENTRE 1990 ET 1999	85
FIGURE 42. COUVERTURES DSL ET WI-FI POUR LE DEPARTEMENT DE LA DROME (IDATE, 2007)	87
FIGURE 43. EVOLUTIONS DEMOGRAPHIQUES DE 1968 A 1999 (INSEE, 2006)	87
FIGURE 44. TOPOGRAPHIE DU DEPARTEMENT DE LA DROME ET SITUATION DE LA COMMUNE DE LA ROCHE-SUR-LE-BUIS	88
FIGURE 45. COLLECTIVITES ET INTERNET A HAUT DEBIT : SITUATION DE LA DROME (JOURNAL DU NET, 15/11/2006)	89
FIGURE 46. TAUX D'ELIGIBILITE PAR COMMUNE	90
FIGURE 47. TERRITOIRE DE DESSERTE DSL A PARTIR DU RESEAU FIBRE OPTIQUE	91
FIGURE 48. DESSERTE MAILLEE WI-FI (ANT, 2007)	93

FIGURE 50. FONCTION D'ANTENNE WI-FI ET DEBITS CORRESPONDANTS.....	96
FIGURE 51. DIFFUSION DU RESEAU INTERNET EN MODE NON FILAIRE A PARTIR D'UN MODE FILAIRE (ARIASE, 2008).....	98
FIGURE 52. AFFAIBLISSEMENT DU SIGNAL RADIO SELON LES TYPES D'OBSTACLE (INTEL, 2005).....	106
FIGURE 53. MNT DE LA ROCHE-SUR-LE-BUIS ET REPARTITION SPATIALE DU BATI.....	107
FIGURE 54. POINTS VISIBLES A PARTIR DU POINT LE PLUS HAUT DE L'ESPACE	108
FIGURE 55. CONNEXION A INTERNET DES MAIRIES DE LA REGION RHONE-ALPES.....	110
FIGURE 56. CHAMP DE VISIBILITE A PARTIR DE LA MAIRIE ET DES INFRASTRUCTURES EXISTANTES.....	111
FIGURE 57. ZONE DE COUVERTURE WI-FI DE 500 M AUTOUR DU POINT D'ACCES (MAIRIE).....	112
FIGURE 58. BATIMENTS VISIBLES ET INTEGRES DANS LA ZONE DE COUVERTURE D'UN POINT D'ACCES (AP)	113
FIGURE 59. CALCUL D'UN POINT DE DESSERTE OPTIMALE.....	114
FIGURE 60. PROPORTION DE BATIMENTS DESSERVIS.....	115
FIGURE 61. LA MAIRIE : UN BATIMENT INVISIBLE PAR RAPPORT AU POINT STRATEGIQUE	116
FIGURE 62. POPULATION ESTIMEE DANS CHAQUE ELEMENT DE BATI	117
FIGURE 63 SURFACE MOYENNE PAR PERSONNE SELON LE TYPE D'AGGLOMERATION (INSEE, 2006)	118
FIGURE 64. PRIX DU TERRAIN MOYEN DANS LES REGIONS FRANÇAISES (INSEE, 2008)	118
FIGURE 65. ESTIMATION DE LA POPULATION PAR UNITE DE BATI EN ZONE URBAINE (EX. VALENCE).....	119
FIGURE 66. EXEMPLE D'OFFRE DE BANQUES DE DONNEES SPATIALES (IGN, 2005)	124
FIGURE 67. ORGANISATION DE L'INTEROPERABILITE DES SIG AU CG 93 AUTOUR D'UN SERVEUR CARTOGRAPHIQUE :	125
FIGURE 68. LA GEO-LOCALISATION, UN SERVICE APPARU AVEC L'EVOLUTION DU WEB (WEB 2.0).....	126
FIGURE 69. LE RAYONNEMENT ELECTROMAGNETIQUE.....	143
FIGURE 70. LE SPECTRE ELECTROMAGNETIQUE (DURRIEU, 2009).....	144
FIGURE 71. RAYONNEMENT DE LA CIBLE ET REFLECTANCE (DURRIEU, 2009)	145
FIGURE 72. LE SPECTRE ELECTROMAGNETIQUE (GIRARD, 1989).....	146
FIGURE 73. FENETRES DE TRANSMISSION ATMOSPHERIQUE UTILISABLES POUR LA TELEDETECTION PASSIVE	146
FIGURE 74. AFFICHAGE D'UN SEUL CANAL (NIVEAUX DE GRIS) (DURRIEU, 2009).....	147
FIGURE 75. AFFICHAGE D'UNE IMAGE EN VRAIES COULEURS (DURRIEU, 2009).....	147
FIGURE 76. AFFICHAGE D'UNE IMAGE EN FAUSSES COULEURS (DURRIEU, 2009).....	148
FIGURE 77. COMPOSITIONS ADDITIVE ET SOUSTRACTIVE DES COULEURS ROUGE, VERT ET BLEU.....	148
FIGURE 78. AXE ACHROMATIQUE D'UN CANAL D'IMAGE	149
FIGURE 79. ABSORPTION, REFLEXION, TRANSMISSION (BONN ET ROCHONS, 1999).....	149
FIGURE 80. PRESENTATION D'UNE IMAGE DANS L'ESPACE DES RADIOMETRIES (IGN, 2005)	150
FIGURE 81. RECAPITULATIF DES ONDES DU SPECTRE ELECTROMAGNETIQUE (ROBIN, 2002)	151
FIGURE 82. VISION HUMAINE ET COULEURS (DURRIEU, 2009)	152
FIGURE 83. PERCEPTION DES OBJETS SELON LEUR RESOLUTION SPATIALE (LABBE, 2010).....	153
FIGURE 84. ECHELLE DE PRECISION DES DONNEES	153
FIGURE 85. LE CONTRASTE, UNE DIFFERENCE DE TON RELATIVE A L'ENVIRONNEMENT DE L'OBJET OBSERVE	154
FIGURE 86. TROIS TYPES DE CONTRASTE DANS UNE IMAGE <i>GOOGLEEARTH</i> DE LA VILLE DE RAQQA (SYRIE) EN 2010.....	155
FIGURE 87. TEXTURE ET STRUCTURE (DURRIEU, 2009).....	156
FIGURE 88. INTERETS ET LIMITES DE LA PIAO (DURRIEU, 2009)	157
FIGURE 89. EXEMPLE DE CONSTRUCTION DE BATIMENTS AVEC DES MATERIAUX LOCAUX : LA VILLE DE DIER-EL- ZOR (SYRIE).....	159
FIGURE 90. EFFET DU CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL SUR LA QUALITE DES IMAGES	160
FIGURE 91. VARIATIONS DES RESOLUTIONS SPATIALES ET DOMAINES D'APPLICATION.....	161
FIGURE 92. DEUX TYPES DE RESOLUTION SPATIALE ET OMBRE PORTEE PAR DES BATIMENTS (<i>EZAB EL BASARTA</i> , EGYPTE).....	161
FIGURE 93. ABSORPTION ATMOSPHERIQUE SELON LES LONGUEURS D'ONDES (DURRIEU, 2010)	162
FIGURE 94. EFFETS DE L'ANGLE DE PRISE DE VUE (PALMAN, 2009)	163
FIGURE 95. L'EFFET RELIEF A L'ORIGINE DE PERTURBATIONS GEOMETRIQUES (LABBE, 2010).....	164
FIGURE 96. STRUCTURE GENERALE D'UNE IMAGE NUMERIQUE	165
FIGURE 97. GEOMETRIE D'UNE IMAGE BRUTE (DURRIEU, 2010).....	165
FIGURE 98. PLATES-FORMES D'IMAGES (BEGUE, 2010))	166
FIGURE 99. STATIONS DE RECEPTION (SPOT, 2006)	166
FIGURE 100. ORBITE GEOSTATIONNAIRE	167
FIGURE 101. ORBITE QUASI POLAIRE	168
FIGURE 102. PASSE MONTANTE ET PASSE DESCENDANTE	169
FIGURE 103. FAUCHEE D'UN SATELLITE	169

FIGURE 104. TYPES DE CAPTEURS EN TELEDETECTION (OFFICE NATIONAL DE LA CHASSE ET DE LA FAUNE SAUVAGE, 2005)	170
FIGURE 105. LA NOTION DE RESOLUTION SPATIALE (LABBE, 2010)	171
FIGURE 106. NIVEAUX DE RESOLUTION ET TAILLE D'IMAGES SATELLITAIRES	172
FIGURE 107. COUT DES IMAGES SATELLITAIRES (BEGUE, 2010)	172
FIGURE 108. CARACTERISTIQUES DE QUELQUES SATELLITES ET FREQUENCE DE LEUR PASSAGE (LABBE, 2010) ..	173
FIGURE 109. TYPES DE SATELLITE AVEC LEURS CARACTERISTIQUES (ARGENTON V. ET AL. 2004-05)	174
FIGURE 110. CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DES IMAGES DE <i>GOOGLE EARTH</i>	183
FIGURE 111. TAILLES DE SCENES D'IMAGES <i>GOOGLE EARTH</i> EN PIXELS	184
FIGURE 112. LA VILLE SYRIENNE D'ALEP 2010 (H. ALAWAD, 2010)	186
FIGURE 113. DETECTION DES CHANGEMENTS DANS LA TACHE URBAINE D'ALEP (SYRIE) ENTRE 2004 ET 2009 ...	187
FIGURE 114. DEFINITION D'UN OBJET URBAIN (LHOMME, 2005)	188
FIGURE 115. PRINCIPAUX TYPES DES VILLAGES PROPOSES PAR L'ECOLE DE GEOGRAPHIE ALLEMANDE (LEBEAU, 1996)	189
FIGURE 116. DEFINITIONS, CONTENUS STRUCTURELS ET FONCTIONNELS DES SYNONYMES DU TERME « BATIMENT » (ATILF- ANALYSE ET TRAITEMENT INFORMATIQUE DE LA LANGUE FRANÇAISE, 2004 ; LE PETIT ROBERT, 1982)	190
FIGURE 117. DEFINITIONS, CONTENUS STRUCTURELS ET FONCTIONNELS DES SYNONYMES DU TERME « HABITATION » (ATILF- ANALYSE ET TRAITEMENT INFORMATIQUE DE LA LANGUE FRANÇAISE, 2004 ; LE PETIT ROBERT, 1982)	191
FIGURE 118. VARIABILITE DE LA DISPERSION SPATIALE A DENSITE EGALE	192
FIGURE 119. DIFFERENTS TYPES DE CRITERES MORPHOLOGIQUES (TSAI, 2005)	192
FIGURE 120. FORME DE DISTRIBUTIONS SPATIALES DE POINTS (PUMAIN ET AL., 1997)	193
FIGURE 121. DEUX MORPHOLOGIES DE LA REPARTITION DU BATI A LA MEME ECHELLE SPATIALE	194
FIGURE 122. MAISON DE TERRE EN FORME D'OGIVES, VILLAGE AU SUD D'ALEP (SYRIE)	195
FIGURE 123. MODE DE CONSTRUCTION DANS L'HABITAT URBAIN, ALEP (SYRIE)	195
FIGURE 124. INFLUENCE DES OBJETS GEOGRAPHIQUES SPATIAUX SUR LA QUALITE DES IMAGES NUMERIQUES (LHOMME, 2003)	196
FIGURE 125. DEUX TYPES DE DONNEES UTILISEES	200
FIGURE 126. PRIMITIVES GEOMETRIQUES SPATIALES	203
FIGURE 127. VARIABILITE DE LA TAILLE ET DU NOMBRE DE PIXELS DANS UNE CIBLE GEOGRAPHIQUE (ESRI, 2007)	203
FIGURE 128. PHASES SUCCESSIVES D'IDENTIFICATION DES OBJETS DANS UNE IMAGE NUMERIQUE	204
FIGURE 129. NATURE DES PARAMETRES A CONSIDERER DANS LE CHOIX D'UNE IMAGE	206
FIGURE 130. STRATEGIE DU CHOIX D'IMAGE	207
FIGURE 131. VALEURS DES PIXELS DES OBJETS SPATIAUX DANS CHAQUE CANAL D'UNE IMAGE. EXEMPLE SPOT- IMAGE	207
FIGURE 132. LIVRON-SUR-DROME (DROME, FRANCE)	208
FIGURE 133. ZONE TEST (LIVRON-SUR-DROME)	209
FIGURE 134. SIGNATURES SPECTRALES DE TYPES D'OBJETS SPATIAUX	210
FIGURE 135. CORRESPONDANCE DES THEMES AVEC LES CANAUX SATELLITAIRES DE LANDSAT TM	211
FIGURE 136. REGLES D'INTERPRETATION DES PHOTOGRAPHIES AERIENNES ET DES IMAGES SATELLITAIRES	212
FIGURE 137. BANDE ROUGE	213
FIGURE 138. METHODE NON SUPERVISEE : AGREGATION AUTOUR DE CENTRE MOBILES (NUEES DYNAMIQUES) (TETIS, 2010)	214
FIGURE 139. RESULTAT DE LA CLASSIFICATION NON-SUPERVISEE DE LA ZONE D'ETUDE EN 7 CLASSES	215
FIGURE 140. COMPARAISON DES METHODES DE CLASSIFICATION SUPERVISEE	216
FIGURE 141. CLASSIFICATION PAR LA METHODE SUPERVISEE DES HYPERCUBES	217
FIGURE 142. HETEROGENEITE SPECTRALE ET LE PROBLEME D'EXTRACTION	218
FIGURE 143. COMPARAISON DES EFFETS D'ECHELLE SUR LA RESTITUTION DE L'HABITAT, EXTRACTION A PARTIR D'UNE IMAGE QUICKBIRD D'UNE RESOLUTION DE 2,4 M (DEVAUX, 2006)	219
FIGURE 144. DIFFERENCES DANS LE MODE D'ORGANISATION DE L'HABITAT ET CONSEQUENCES POUR L'APPREHENSION DE L'ECHELLE DE TRAVAIL (ALEP, SYRIE)	220
FIGURE 145. VARIETE DES MODES DE CONSTRUCTION A RAQQA (SYRIE)	220
FIGURE 146. RESULTATS D'EXTRACTION AUTOMATIQUE	221
FIGURE 147. RESULTATS D'EXTRACTION AUTOMATIQUE	222
FIGURE 148. SIGNATURE SPECTRALE DE BATIMENTS DANS LES TROIS BANDES D'UNE IMAGE SOUS <i>ERDAS IMAGINE</i>	223
FIGURE 149. SIGNATURE SPECTRALE DE BATIMENTS A PARTIR D'UNE SEULE BANDE DE L'IMAGE SOUS <i>ARCGIS</i>	223

FIGURE 150. METHODES DE TRAVAIL EN TELEDETECTION (KERGOMARD, 2003).....	224
FIGURE 151. ETAPES DE LA PHASE D'ANALYSE DANS LA PROCEDURE D'EXTRACTION.....	227
FIGURE 152. PRINCIPE D'EXTRACTION D'UNE CIBLE A PARTIR D'UNE IMAGE (EX. BATI)	228
FIGURE 153. PRINCIPAUX SYSTEMES DE PROJECTIONS UTILISEES DANS LE MONDE (SIGEA).....	229
FIGURE 154. GEOREFERENCEMENT EN <i>RASTER</i> (ESRI, 2007).....	229
FIGURE 155. PRINCIPE DE SEUILLAGE (IGN, 2005).....	231
FIGURE 156. SEUILS DU BATI SUR LE CANAL ROUGE DE L'IMAGE	232
FIGURE 157. PRINCIPE DE L'OPERATION « FUSION ».....	232
FIGURE 158. EXTRACTION DU BATI SUR LA COMMUNE LIVRON-SUR-DROME (H. ALAWAD, 2010)	235
FIGURE 159. COMPARAISON DES RESULTATS D'EXTRACTION DE <i>GOOGLE EARTH</i> ET <i>GEOPORTAIL</i>	236
FIGURE 160. EXTRACTION DU BATI SUR LA COMMUNE DIER-EL-ZOR (SYRIE) (H. ALAWAD, 2010)	237
FIGURE 161. PERTINENCE DES ECHELLES GEOGRAPHIQUES SELON L'OBJECTIF DE L'APPLICATION.....	241
FIGURE 162. PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES IMAGES DE <i>GOOGLE EARTH</i> ET DE <i>GEOPORTAIL</i>	242
FIGURE 163. ECHELLE PERTINENTE D'APPLICATION SELON DEUX SOURCES D'IMAGES	243
FIGURE 164. INTERACTION ENTRE LES TROIS OUTILS MOBILISES DANS LE CADRE DE LA THESE.....	253

REMERCIEMENTS	5
INTRODUCTION GENERALE	7
PARTIE 1	
INEGALITES TERRITORIALES NUMERIQUES ET REDUCTION DE LA FRACTURE NUMERIQUE	19
INTRODUCTION DE LA PREMIERE PARTIE	21
1. CHAPITRE 1	
LES DIMENSIONS GEOGRAPHIQUES DES TECHNOLOGIES D'INFORMATION ET DE LA COMMUNICATION (TIC)	22
INTRODUCTION	23
1.1. <i>LES TIC ET L'ESPACE GEOGRAPHIQUE</i>	24
1.2. <i>INTERNET EST UN RESEAU DE TRANSPORT D'INFORMATIONS NUMERIQUES</i>	26
1.3. <i>LES TIC COMME ELEMENT DE DEVELOPPEMENT DURABLE</i>	29
1.4. <i>UNE NOUVELLE CONCEPTION DES RELATIONS ENTRE TELECOMMUNICATIONS ET TERRITOIRE</i>	31
1.5. <i>LE RESEAU INTERNET PEUT-IL ANNULER L'EFFET DE LA DIMENSION SPATIALE ?</i>	32
1.6. <i>LE RESEAU INTERNET SUPPRIME LES FRONTIERES NATIONALES (UN RESEAU MONDIAL)</i>	34
1.7. <i>LES DIFFERENCIATIONS REGIONALES DE DEVELOPPEMENT NUMERIQUE : ETUDE SUR LE BASSIN MEDITERRANEEN</i>	38
1.8. <i>LE HAUT DEBIT EN FRANCE</i>	38
CONCLUSION	43
2. CHAPITRE 2	
INEGALITES SPATIALES DANS LA DESSERTE D'INTERNET ET DANS LES MODES DE CONNEXION EN FRANCE	44
INTRODUCTION	45
2.1. <i>INEGALITES TERRITORIALES DE REPARTITION DES RESEAUX DE TELECOMMUNICATION EN FRANCE</i>	46
2.2. <i>LA COUVERTURE DU MILIEU RURAL PAR LE HAUT DEBIT (FRANCE)</i>	48
2.3. <i>DESSERTE A HAUT DEBIT AU SEIN D'UN DEPARTEMENT FRANÇAIS (LA DROME)</i>	52
2.4. <i>MODES DE CONNEXION A INTERNET</i>	56
2.4.1. <i>Les technologies filaires</i>	57
2.4.1.1. Le RTC: le réseau téléphonique commuté	57
2.4.1.2. L'Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL)	58
2.4.1.3. Le câble	60
2.4.1.4. La fibre optique	61
2.4.1.5. 2.4.1.5. Le courant porteur en ligne (CPL)	63
2.4.2. <i>Les technologie non filaires</i>	63
2.4.2.1. La Boucle Locale Radio (BLR)	63
2.4.2.2. La famille des réseaux locaux radioélectriques (RLAN) : le Wi-Fi	64
2.4.2.3. Le Wimax	67
2.4.2.4. Le satellite	68
2.4.2.5. Le téléphone mobile	70
2.5. <i>LES USAGES D'INTERNET</i>	73
2.6. <i>LE HAUT DEBIT, POUR QUOI FAIRE?</i>	77
CONCLUSION	79
3. CHAPITRE 3	
CHOIX D'UNE COMMUNE D'ETUDE ET ANALYSE DES TECHNOLOGIES DE DESSERTE CORRESPONDANTES	80
INTRODUCTION	81
3.1. <i>CHOIX DE LA COMMUNE DE DESSERTE</i>	82
3.1.1. <i>Étude démographique du département de la Drôme</i>	82
3.1.2. <i>Caractéristiques démographique et choix d'une commune : La Roche-sur-le-Buis</i>	86
3.2. <i>LE WI-FI COMME CHOIX DE LA TECHNOLOGIE DE DESSERTE</i>	89
3.2.1. <i>L'architecture de la desserte sans fil</i>	93
3.3. <i>LE CHOIX DU POINT D'ACCES (AP)</i>	94
3.3.1. <i>Le Wi-Fi à la norme 802.11</i>	94
3.3.2. <i>Un nombre de points d'accès (AP) limité</i>	95

3.3.3.	<i>Le partage du débit</i>	95
3.3.4.	<i>L'augmentation de la zone de couverture de l'AP</i>	97
3.3.5.	<i>Les similitudes techniques du point d'accès Wi-Fi et des relais intermédiaires</i>	97
3.3.6.	<i>Relations techniques entre le point d'accès Wi-Fi et les relais intermédiaires</i>	98
3.3.7.	<i>Les capacités de desserte des relais intermédiaires</i>	99
CONCLUSION		100
4. CHAPITRE 4		
SCENARIOS DE DESSERTE PAR LA TECHNOLOGIE WI-FI ET METHODE D'ESTIMATION DE LA POPULATION A DESSERVIR		101
INTRODUCTION		102
4.1.	LES DONNEES DANS LES BASES IGN	103
4.1.1.	<i>La BD-TOPO Pays</i>	103
4.1.2.	<i>La BD-TOPO MNT</i>	104
4.2.	CHOIX DES MODELES DE DONNEES RASTER ET VECTEUR	104
4.3.	LE PRINCIPE D'ANALYSE DU CHAMP DE VISIBILITE	105
4.4.	LES PROJECTIONS	105
4.5.	UN MNT COMPATIBLE POUR L'ANALYSE DU CHAMP DE VISIBILITE	105
4.6.	STRATEGIE D'IMPLANTATION D'UN POINT D'ACCES (AP)	108
4.7.	TROIS SCENARIOS D'ETUDE POUR INSTALLER L'AP	109
4.7.1.	<i>La mairie comme point d'accès (AP)</i>	110
4.7.2.	<i>La position stratégique de l'AP (Point d'Accès) dans un espace donné</i>	114
4.7.3.	<i>Vers une desserte optimale</i>	115
4.8.	METHODE D'ESTIMATION DE LA POPULATION COMMUNALE A PARTIR DU BATI	116
CONCLUSION		121
5. ELEMENTS DE REFLEXION ET PISTES DE RECHERCHE		122
6. CONCLUSION DE LA PARTIE 1		128
PARTIE 2		
ANALYSE DU BATI A L'AIDE DES TIC (GOOGLE EARTH) POUR LA REDUCTION DE LA FRACTURE NUMERIQUE		135
INTRODUCTION DE LA DEUXIEME PARTIE		137
1. CHAPITRE 1		
TELEDETECTION ET INTERPRETATION DES IMAGES NUMERIQUES		141
INTRODUCTION		142
1.1.	NOTIONS FONDAMENTALES DE TELEDETECTION	143
1.1.1.	<i>Rayonnement électromagnétique (REM) et spectre électromagnétique</i>	143
1.1.2.	<i>Rayonnement et spectre électromagnétique</i>	145
1.1.3.	<i>Visualisation et principe d'affichage d'une image de la télédétection</i>	146
1.1.4.	<i>Réflexion et réflectance : deux notions de référence</i>	149
1.2.	LA PHOTO-INTERPRETATION : VISION ET CONTRASTE	151
1.2.1.	<i>L'interprétation visuelle de l'image: l'importance de couleurs</i>	152
1.2.2.	<i>Traitement d'image et amélioration de l'interprétation visuelle de l'image</i>	154
1.2.3.	<i>Texture et structure des images : une double approche pour l'interprétation</i>	156
1.2.4.	<i>Intérêts et limites de la Photo-Interprétation Assistée par Ordinateur (PIAO)</i>	156
1.3.	LES EFFETS PERTURBATEURS SE MANIFESTANT SUR L'IMAGE BRUTE	157
1.3.1.	<i>Les effets de brouillage de l'image</i>	158
1.3.2.	<i>Effet de masque et influence du contexte environnemental</i>	159
1.3.3.	<i>La résolution et son effet sur l'image</i>	160
1.3.4.	<i>Les perturbations atmosphériques et leurs corrections géométriques</i>	162
1.3.5.	<i>Les effets de l'angle de prise de vue</i>	162
1.3.6.	<i>Effets dus au relief</i>	163
1.4.	STRUCTURE ET CARACTERISTIQUES DE L'INFORMATION DANS L'IMAGE NUMERIQUE	164
1.4.1.	<i>La structure de l'image</i>	164
1.4.2.	<i>Caractéristiques des informations radiométriques dans une image numérique</i>	165
1.4.3.	<i>Les sources d'image : les plates-formes</i>	166
1.4.3.1.	<i>Les satellites</i>	167

1.4.3.1.1.	Les caractéristiques d'un satellite : l'orbite et sa fauchée	167
1.4.3.1.2.	Les capteurs utilisés	170
1.4.3.1.3.	Les différents types de satellite	173
1.4.3.2.	Les images aériennes	174
1.4.3.2.1.	Les capteurs multi-bandes aéroportés	175
CONCLUSION		177
2. CHAPITRE 2		
L'ANALYSE D'IMAGES ISSUES DE <i>GOOGLE EARTH</i> :		
EVALUATION ET PERTINENCE POUR LA DETECTION DE L'ETALEMENT URBAIN		178
INTRODUCTION		179
2.1.	<i>VISUALISATION ET EXPLOITATION DE NOUVELLES SOURCES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE</i>	180
2.2.	<i>Modes de représentation des données spatiales en géographie</i>	181
2.3.	<i>LES IMAGES GOOGLE EARTH</i>	182
2.4.	<i>DETECTION DE CHANGEMENTS ENTRE DES IMAGES GOOGLE EARTH A DEUX DATES DIFFERENTES</i>	186
2.5.	<i>LES NOTIONS A PRENDRE EN COMPTE DANS LA PROCEDURE D'EXTRACTION DU BATI DANS LES IMAGES NUMERIQUES</i>	188
2.5.1.	<i>Bâtiments et habitations en géographie</i>	188
2.5.2.	<i>Changement conceptuel du bâtiment à l'habitation : du structure à la fonction</i>	189
2.5.3.	<i>La densité des habitations, une notion variable entre concentration et dispersion</i>	191
2.5.4.	<i>Morphologie de la distribution spatiales des objets</i>	192
2.5.5.	<i>Les matériaux de construction et leurs effets sur la procédure d'extraction</i>	194
2.5.6.	<i>Influence des objets urbains sur la qualité de l'image numérique</i>	195
CONCLUSION		197
3. CHAPITRE 3		
LES METHODES D'EXTRACTION DU BATI PAR TELEDETECTION		
A PARTIR DES IMAGES <i>GOOGLE EARTH</i>		198
INTRODUCTION		199
3.1.	<i>DEMARCHE LOGIQUE D'EXTRACTION D'UN OBJET</i>	200
3.1.1.	<i>Le choix du thème : des pixels à l'objet géographique</i>	202
3.1.2.	<i>Stratégie du choix d'image</i>	204
3.1.2.1.	<i>Le choix d'une image dans un espace d'étude</i>	208
3.1.3.	<i>Choix de la bande spectrale d'image à l'aide de la signature spectrale de l'objet</i>	210
3.1.3.1.	<i>Choix de la bande spectrale</i>	211
3.1.4.	<i>Choix de la méthode spectrale (approches classiques)</i>	213
3.1.4.1.	<i>L'approche non-supervisée appliquée aux images de Google Earth</i>	214
3.1.4.2.	<i>L'approche supervisée appliquée aux images de Google Earth</i>	215
3.2.	<i>PROBLEMES RENCONTRES DANS UN TEL TYPE D'ANALYSE</i>	217
3.3.	<i>EFFET D'ECHELLES ET PERCEPTION DE LA CIBLE</i>	218
3.4.	<i>QUALITE COMPAREE D'UNE EXTRACTION DE SIGNATURE SPECTRALE PAR DEUX LOGICIELS</i>	220
CONCLUSION		225
4. CHAPITRE 4		
VERS UNE NOUVELLE APPROCHE METHODOLOGIQUE D'EXTRACTION DU BATI		
A L'AIDE D'UN SIG : INTERETS ET LIMITES		226
INTRODUCTION		227
4.1.	<i>LES ETAPES D'EXTRACTION DES ELEMENTS BATIS</i>	227
4.1.1.	<i>Etape du géoréférencement</i>	228
4.1.2.	<i>Etape de vectorisation de l'image</i>	229
4.1.3.	<i>Etape du seuillage de pixels</i>	230
4.1.4.	<i>Etape de fusion des pixels vectorisés</i>	232
4.1.5.	<i>Etape de nettoyage automatique par filtrage</i>	232
4.1.6.	<i>Etape de nettoyage manuel</i>	233
4.1.7.	<i>Calcul de superficie</i>	233
4.1.8.	<i>Filtrage surfacique</i>	233
4.2.	<i>CARTOGRAPHIE DU RESULTAT FINAL DE L'EXTRACTION</i>	234
4.3.	<i>EXEMPLE D'APPLICATION NATIONALE SUR UNE COMMUNE DROMOISE : LIVRON-SUR-DROME</i>	234
4.4.	<i>EXEMPLE D'APPLICATION INTERNATIONALE SUR UNE COMMUNE SYRIENNE : DIER-EL-ZOR</i>	236
CONCLUSION		238

5. ELEMENTS DE REFLEXION ET PISTES DE RECHERCHE	239
6. CONCLUSION DE LA PARTIE 2	244
CONCLUSION GENERALE	249
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	255
TABLE DES FIGURES ET TABLE DES MATIERES	269