

Chapitre 5

Modélisation opérationnelle du paysage

5.1. Introduction

Pour recomposer et caractériser le paysage dans les trois dimensions du volume scénique, il est proposé de partir de données numériques géoréférencées. A cette fin, il convient de mettre en œuvre un certain nombre de principes techniques faisant appel à la trigonométrie [BIS 89, CRA 94]. Parmi les options possibles, nos choix sont guidés par la conception géographique du paysage définie dans la section précédente : inscrit dans le *continuum* spatio-temporel, le paysage est partout et les points de vue qu'il offre méritent tous d'être pris en compte *a priori*, sans critères sélectifs d'ordre culturel ou esthétique [BIS 94]. Ce souci d'exhaustivité spatiale conduit à privilégier le format matriciel (ou *raster*) des données, format particulièrement bien adapté pour produire des indicateurs paysagers susceptibles d'être cartographiés et de prendre sens dans de nombreux domaines scientifiques ou appliqués, bien au-delà du champ strict de la géographie [GUS 98]. Cette option initiale en faveur du mode matriciel nous amènera à considérer les diverses contraintes qui en découlent dans la conception des bases d'information et dans le choix des sources de données afférentes [BRO 94]. A cet égard, la prise en compte des effets d'échelle dans la composition du paysage est déterminante. Enfin, une série de cartes permettra d'explicitier la façon dont certaines notions associées à l'approche géographique du paysage et exposées en première partie, peuvent être transcrites sous la forme d'indicateurs numériques à valeur générale ou plus étroitement ciblés : ampleur de vue, soumission à la vue, vue sélective.

Chapitre rédigé par Thierry BROSSARD, Daniel JOLY et François-Pierre TOURNEUX.

5.2. Le modèle de reconstruction

Le principe de reconstruction du paysage est illustré par les figures 5.1 et 5.2. La première montre une carte d'occupation du sol qui a été simplifiée en 4 classes pour des raisons de lisibilité. Le secteur représenté est celui du Val de Morteau (Doubs). Ce document est tiré de la base Corine Land Cover, fournie à l'origine en mode vectoriel. Pour les besoins du protocole, l'information a été *rasterisée* à la résolution de 50 mètres qui s'accorde avec la précision initiale des données. Ainsi constituée, cette couche d'information est directement superposable au *modèle numérique de terrain* (MNT) diffusé par l'IGN avec la même résolution. Sur le plan de référence (Lambert II étendu) où se calent les données, le cône de vue correspondant à l'image de la figure 5.1, est mis en place.

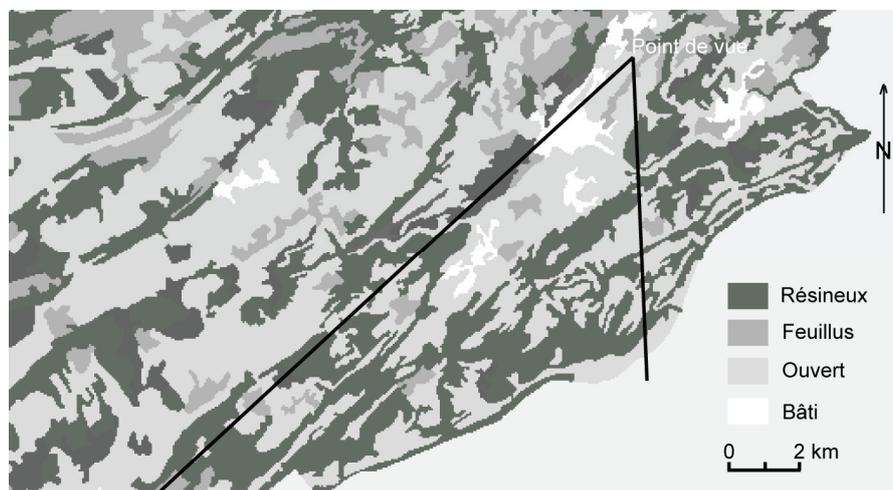


Figure 5.1. Mise en place du cône de vue sur la carte d'occupation du sol

Ce panorama a été recomposé, par calcul trigonométrique, à partir des deux couches d'information initiales [BIS 89]. Pour recréer l'effet de masque dû aux éléments bâtis ou arborés, une hauteur standard a été affectée à chacune de ces catégories ainsi qu'un figuré type suggérant la physionomie des sursols. L'image obtenue constitue une sorte d'épure du paysage qui donne à voir les grands traits qui organisent celui-ci : l'enfilade du val lui-même assez densément construit, un alignement de feuillus au premier plan, des monts boisés et coupés de clairières et dont les lignes de faite se superposent à l'arrière plan jusqu'à l'horizon. Ce type de visualisation n'a évidemment qu'un intérêt limité pour rendre compte de la richesse sensible du paysage mortuacien. En revanche, dans la mesure où l'information requise est disponible pour l'Europe entière, il est techniquement envisageable de

recréer une vue paysagère de même facture, en tout point de ce vaste territoire, à intervalle de 50 mètres et en balayant le tour d'horizon. Il y a donc matière à caractériser, à classer et à comparer les paysages, par grands ensembles et selon des critères partout équivalents [BRW 94, ART 77]. Dans cet objectif, l'image nous donne accès à une quantité et à une diversité d'information non négligeable. Voyons comment.

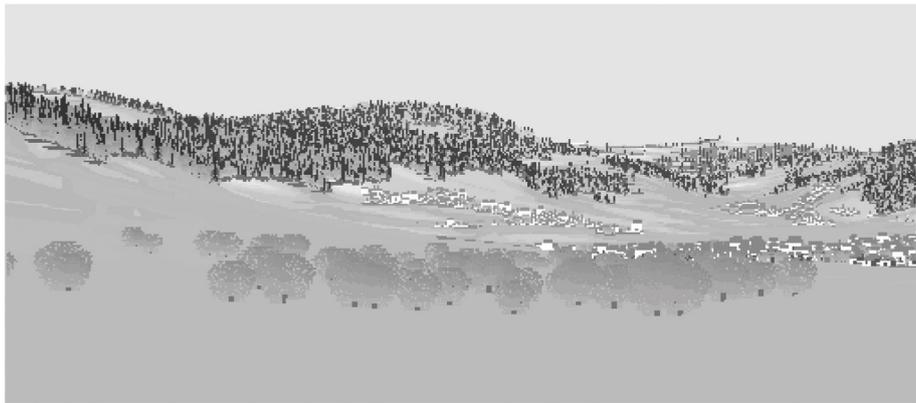


Figure 5.2. *Epure paysagère obtenue du croisement entre occupation du sol et MNT*

Dans la mesure où les données initiales sont géoréférencées, les transferts d'information entre les deux dimensions du plan géographique et les trois dimensions du volume scénique opèrent dans les deux sens : si l'image de synthèse est le résultat d'un transfert de 2D vers 3D, l'opération inverse permet de reporter sur le carroyage et de cartographier les résultats de l'analyse du paysage faite à partir du volume scénique recomposé. Ainsi, un indicateur paysager tel que l'ampleur de vue par exemple, se calcule en dénombrant les unités de carroyage (ou pixels) qui composent le panorama, à l'exclusion des zones cachées par le relief et les sursols. En réalisant cette opération sur un tour d'horizon complet, on obtient, en projection, la surface donnée à voir ou ampleur de vue : cette valeur calculée constitue un nouvel attribut de l'unité de carroyage où se situe le point de prise de vue. Outre la surface globale, on peut affiner le décompte par catégorie d'occupation de sol, par critère topographique (détailler la vue selon qu'elle donne sur des versants pentus ou des crêtes, une plaine continue ou des plans rompus etc.), en termes de soumission à la vue ou d'encaissement (par exemple vue dominée ou dominante). De la sorte, l'information est d'abord déployée dans le volume pour reconstruire, par simulation, le paysage autour d'un point d'ancrage ; elle est ensuite analysée et traduite en indicateurs chiffrés ; enfin, sous cette forme, elle est rabattue sur une unité singulière du carroyage pour être archivée. Cet enchaînement d'opérations montre que les transferts entre 2D et 3D s'accompagnent de mouvements de déploiement-contraction

de l'information spatiale. Ce jeu de va-et-vient est au coeur de l'approche numérique du paysage que nous proposons et lui confère une part essentielle de ses qualités expérimentales. Grâce à ces principes formels, les propriétés du paysage, définies en première partie, peuvent être commodément explorées en parcourant systématiquement l'espace [LAN 94, ORL 94, FIS 96] ; quelques grands types d'indicateurs paysagers seront présentés ci-après à l'aide de cartes (figures 5.7 à 5.10). Dans les chapitres suivants, l'on verra que ces modalités d'investigation du paysage peuvent être affinées et démultipliées au gré des applications et de leurs besoins spécifiques.

Pour poser ci-dessus les principes de modélisation du paysage, nous avons pris appui sur des données adaptées à la caractérisation et la différenciation de grands ensembles spatiaux. Cependant, dans la plupart des cas, ce niveau d'appréhension du paysage est insuffisant et des informations plus précises sont requises. Cela impose d'opérer des ajustements dans le choix des sources, dans la structuration des bases et dans la mise en œuvre de la modélisation. Ce travail se règle le plus souvent au cas par cas et il serait vain de chercher à faire un état exhaustif de la question. Cependant, au-delà de la diversité des applications, il est possible de donner des repères utiles pour calibrer les protocoles d'analyse. C'est ce que nous faisons maintenant en sériant par grandes catégories les éléments à prendre en considération.

5.3. La modélisation et ses contraintes d'ordre géométrique et scalaire

Ces contraintes tiennent au fait que le paysage est inscrit dans l'espace, elles déterminent toutes les autres. En effet, la vue d'un paysage embrasse l'espace dans un éloignement progressif, au sein duquel l'observateur peut reconnaître des objets qui se différencient selon la distance. L'arbre vu à 20 mètres devient un élément de forêt indistinct à trois kilomètres. La prairie ou le champ de céréales, différenciés de près et suivant la saison, se confondent au loin sous le vocable de formations ouvertes. Or, en mode matriciel, quelle que soit la résolution, 10 ou 50 mètres, chaque cellule ne peut contenir qu'une information (côte d'altitude pour le relief, arbre ou pré ou route, etc., pour l'occupation du sol) mais un arbre ou une maison ne font ni 10, ni 50 mètres de côté, pas plus que le relief n'est constitué d'un jeu de marches d'escalier de même calibre. Dans tous les cas, le paysage tel qu'il apparaît dans la variété de ses configurations et dans la continuité de l'espace ne peut être qu'approché.

5.3.1. Précision de l'information et profondeur de champ, recours aux bases multi-échelle

Le recours à la très haute résolution offre une solution pour améliorer la précision géométrique dont on a besoin pour recomposer les paysages proches. Des bases de données sont commercialisées comme le *référentiel à grande échelle* (RGE) de l'IGN ou peuvent être constituées à partir de sources spécifiques. Par exemple, des MNT à résolution inframétrique peuvent être confectionnés grâce à différentes techniques d'imagerie optique ou radar ; l'occupation du sol peut être constituée, avec une précision équivalente, à partir d'orthophotographies ou d'images de télédétection comme celles du satellite Ikonos. Cependant, en l'état actuel, ces solutions restent encore expérimentales et difficile à généraliser pour des raisons de coût et de maniabilité dès que la surface à couvrir devient importante : à un mètre de résolution, la couverture d'une petite région comme la Franche-Comté demande environ 3,5 Go (gigaoctets) par couche d'information. Des solutions de compression-décompression des données sont toujours possibles mais la masse d'information à traiter instantanément à chaque itération ne change pas.

On en vient ainsi à une autre limite de la haute résolution, qui tient aux temps de calcul. En effet, pour recomposer la vue au mieux, il convient de ne pas se cantonner aux plans paysagers proches et de considérer *a priori*, la vue la plus ample possible afin de ne pas borner arbitrairement les échappées visuelles les plus lointaines. Or, le nombre d'opération à réaliser croît d'abord en fonction de la surface testée autour de chaque point, puis en fonction de la finesse de résolution ; passer de 50 à 10 mètres de résolution multiplie les calculs par 25 et si on descend au mètre, par 2 500 ; enfin, la répétition de la procédure de reconstitution du paysage s'accompagne du même effet multiplicatif puisque le nombre de points visités augmente en même proportion. On le voit, la précision géométrique de l'information pose un vrai dilemme : les résolutions moyennes (décamétriques) permettent de couvrir commodément de vastes territoires et d'analyser le paysage dans toute son amplitude en chaque point mais avec un déficit de précision pour les plans proches ; à l'inverse, la haute résolution (métrique ou inframétrique) autorise une grande fidélité de restitution des premiers plans mais avec des limites importantes en termes de couverture spatiale, de faisabilité technique et financière. Une approche multiscalaire permet de réduire cette difficulté ; elle consiste à mobiliser, par couronnes concentriques (ou buffers) de taille variable, l'information issue de plusieurs bases de données en résolutions différentes comme le résume le schéma de la figure 5.3 [BRO 99].

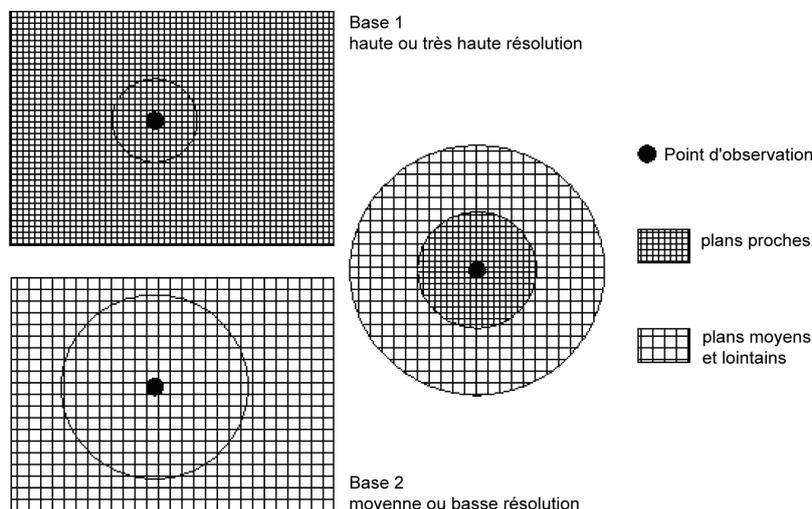


Figure 5.3. Travail en échelles emboîtées à l'aide de bases de données en résolutions différentes

La haute résolution fournit l'information utile pour reconstituer le paysage des plans proches avec une précision correspondante, tandis que la moyenne ou la basse résolution interviennent pour les plans plus lointains. En même temps que la précision géométrique des résolutions, il convient de faire varier la précision thématique de l'occupation du sol dont le nombre de catégories sera moindre pour les basses résolutions. Un exemple de ce type sera présenté au chapitre 9 où quatre bases en résolution de 7, 30, 150 et 1000 mètres ont été traitées en même temps dans le cadre d'une application sur la valeur économique des paysages.

5.3.2. Prise en compte du tour d'horizon par échantillonnage angulaire

Pour réduire le nombre d'itérations et améliorer encore les temps de calcul, une procédure d'échantillonnage du tour d'horizon par rayons divergents peut compléter le dispositif [GOL 71]. L'écart angulaire entre chaque rayon fixe le taux d'échantillonnage puisque seuls, les pixels recoupés sont testés (figure 5.4a). Un échantillonnage lâche, à 15° , permet une analyse exhaustive jusqu'à environ cinq pixels du point de base. Au-delà, entre deux rayons connexes, s'ouvre un espace non testé, dont l'ampleur augmente avec la distance. A 120 pixels de l'origine et en fixant l'écart angulaire à 15° , 32 pixels ne sont pas pris en compte. Un resserrement de l'échantillonnage à 1° permet une analyse exhaustive jusqu'à 60 pixels. Aussi convient-il de trouver le compromis qui, tout en limitant le temps de calcul, permet

une exploration satisfaisante du champ visuel. A cet égard, soulignons que la plupart des objets à faible emprise au sol (exception faite des ouvrages d'art à forte élévation ou des éléments en fort contraste de forme et de couleur) tendent à se confondre avec les éléments visuels plus vastes qui structurent les arrière-plans. De plus, le recours à des bases différentes fait que l'emboîtement des résolutions amène à compenser les vides qui s'ouvrent entre deux rayons avec l'éloignement (figure 5.4b).

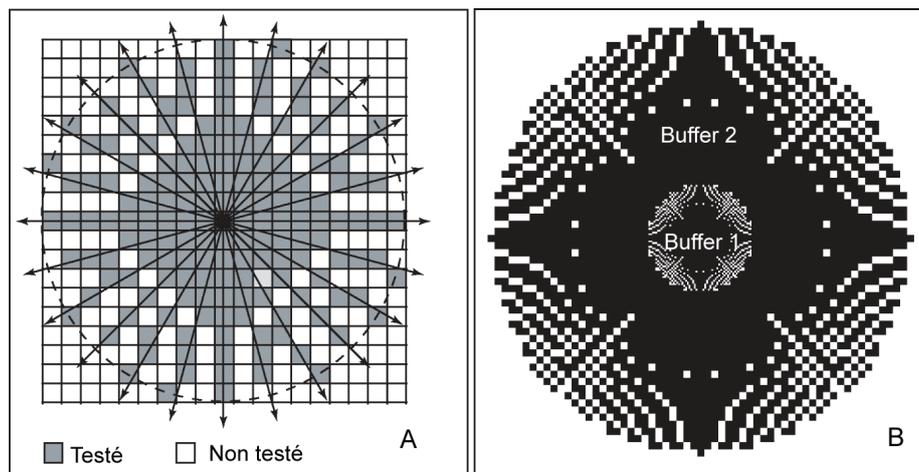


Figure 5.4. *Echantillonnage angulaire du tour d'horizon : A, lancer de rayons et densité de l'échantillonnage ; B, tests emboîtés sur les différentes bases*

5.3.3. Définition des hauteurs de sursol

Pour tenir compte des masques qu'ils constituent, les objets doivent être définis en hauteur. Cette information est en principe tirée d'une couche de données spécifique, le modèle numérique d'élévation (MNE). Techniquement, le MNE se présente une forme analogue au MNT. La différence tient au fait que les cotes qu'il contient, restituent l'altitude au faite des objets (maisons, arbre, buissons etc.) et non à la surface du sol. L'écart entre MNE et MNT donne la hauteur des objets constituant les sursols et dont la nature est définie par l'occupation du sol. La photogrammétrie, le traitement de données radar ou laser (Lidar) offrent les ressources nécessaires pour constituer ce type d'information. L'IGN propose également des produits de ce type mais ils restent encore peu répandus et on butte, ici encore, sur des problèmes de coût et de faisabilité. A défaut d'avoir un accès commode à ce genre de données, l'alternative consiste à affecter les différents types d'occupation du sol d'une hauteur standard modulable par l'opérateur. Par exemple, eau, routes, voies ferrées formations végétales ouvertes prendront une hauteur nulle

tandis que, feuillus bâti et buissons pourront être élevés respectivement à 20, 15, et 7 mètres. La standardisation des hauteurs ainsi appliquée peut paraître une source d'approximation gênante. Il faut toutefois relativiser l'incidence négative du procédé. En effet, d'un point à l'autre, les erreurs se compensent et surtout, la hiérarchie des rapports de visibilité entre les points d'une même aire d'étude reste valide. Autrement dit, la distribution cartographique des différentes zones de visibilité reste stable ; la modification des hauteurs d'objets ne joue qu'à la marge, en faisant glisser quelque peu les valeurs de visibilité le long de gradients dont la pente reste inchangée. On peut d'ailleurs corriger l'effet abrupt qui résulte d'une application uniforme de hauteurs standard en faisant varier celles-ci aléatoirement à l'intérieur d'une fourchette préalablement calibrée.

5.3.4. Calculs de visibilité en surface projetée

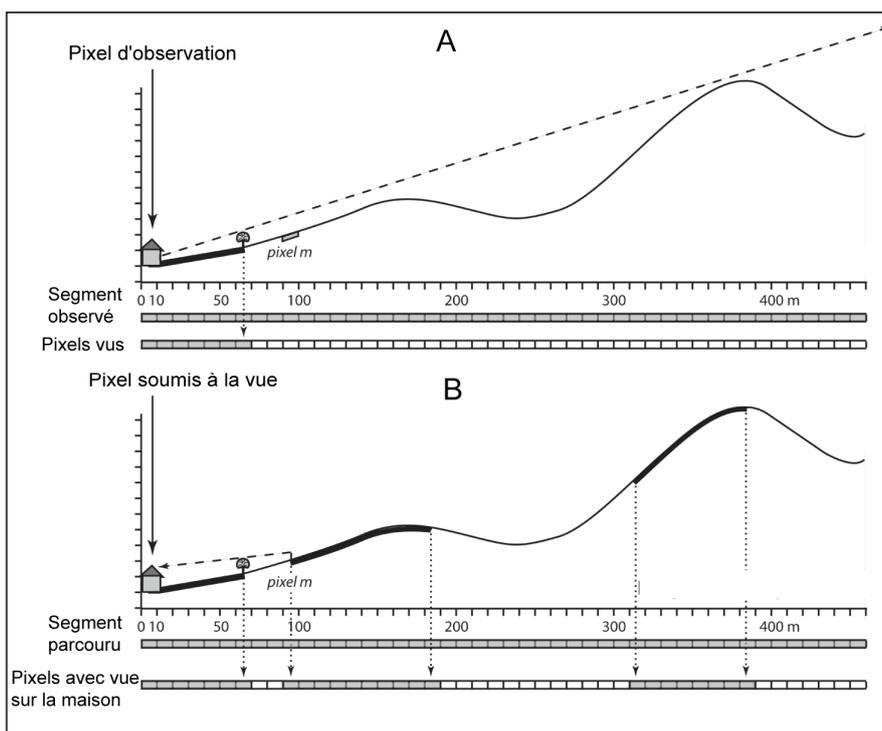


Figure 5.5. Indices de visibilité le long d'un segment d'échantillonnage
 A) ampleur de vue, B) soumission à la vue

La figure 5.5 illustre la façon dont l'information déployée dans le volume scénique est analysée le long des rayons d'échantillonnage, puis rabattue sur le plan de projection pour donner lieu au calcul d'indices selon les deux termes fondamentaux de la visibilité : ampleur et soumission.

En 5.5a, on détermine la part du segment visible pour un observateur de 1,8 mètre, situé devant la maison. Le masque constitué par l'arbuste à 70 mètres bloque totalement la vue dans cette direction, l'ampleur de vue mesurée est de 7 pixels (ou unités de carroyage). En 5.5b, l'observateur virtuel s'est déplacé le long du segment en marquant l'arrêt à chaque pixel et en axant son regard vers la maison qu'il a pu voir ou pas. En raison de son élévation, celle-ci est bien en vue puisque la soumission mesurée est de 25 pixels sur les 46 qui composent le segment. A partir de cette illustration, on comprend facilement comment la procédure peut être mise en œuvre pour faire l'inventaire des propriétés visuelles du paysage : analyse du tour d'horizon par la technique des rayons divergents, ratios zones vue/zones cachées, calcul d'indices globaux ou par tranches en fonction de l'éloignement, par types d'occupation du sol, etc.

5.3.5. Calcul de visibilité en surface angulaire

Le décompte des pixels exprimé en surface offerte au regard comme nous venons de le voir, constitue un indicateur de l'ampleur visuelle. Malgré son intérêt, cette valeur n'appréhende qu'une partie des rapports de visibilité qui s'établissent entre observateur et paysage. Par exemple, une plaine cultivée vue au loin et rapportée à la surface couverte par le regard peut prendre une part importante du champ visuel lorsqu'on la mesure en kilomètres carrés, mais cette même plaine, telle qu'elle s'inscrit dans le volume scénique du paysage, est perçue avec un angle incident très faible qui en réduit l'importance panoramique à un liseré étroit juste au-dessous de la ligne d'horizon. A l'opposé, une maison ou un arbre proches peuvent remplir toute la vue malgré une emprise au sol réduite. Pour tenir compte de la distorsion induite par la vue tangentielle, il convient de se référer à la notion de surfaces angulaires restituant l'impact visuel des composants paysagers [GER 01]. La surface angulaire s'obtient en faisant le produit des composantes angulaires verticales et horizontales d'un objet.

La relation visuelle entre un observateur et un objet élevé (figure 5.6) peut être schématisée par une figure pyramidale dont le sommet \hat{O} correspond à l'œil de l'observateur et la base à la section visible de l'objet, assimilée ici à un carré ABCD. L'angle $\hat{A}\hat{O}\hat{B}$ détermine l'angle vertical et l'angle $\hat{B}\hat{O}\hat{C}$, l'angle horizontal de l'objet en question. Le calcul du produit $\hat{A}\hat{O}\hat{B} \times \hat{B}\hat{O}\hat{C}$ correspond à la surface angulaire de celui-ci. Dans le modèle proposé où les objets sont traités par catégories d'occupation du sol, l'opération revient à calculer la surface angulaire que prend

chaque pixel dans le volume scénique. Par rapport au schéma qui montre un objet disposé perpendiculairement à l'axe de vue, d'autres paramètres viennent compléter le mode de calcul : fuyantes verticales et horizontales, pente et orientation. Ensuite les surfaces angulaires donnent lieu à la confection d'indices au même titre que les surfaces projetées : indices globaux ou par catégorie, en valeurs brutes ou en ratios etc. Surfaces projetées et surfaces angulaires peuvent être mises en rapport pour discriminer les paysages fuyants ou saillants. Les premiers se caractérisent par une faible surface angulaire et une grande surface projetée (cas d'une plaine ou le regard porte à perte de vue) et tandis que chez les seconds, le rapport s'inverse (cas de paysage où la vue se bloque sur des masques verticaux ayant une faible emprise au sol).

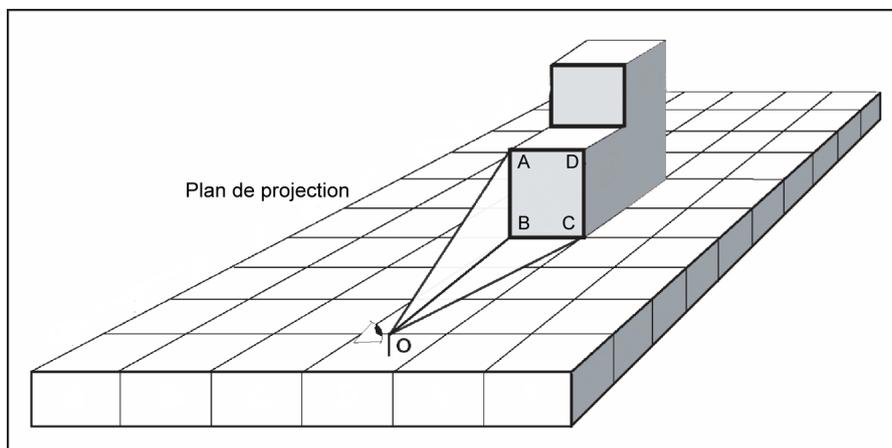


Figure 5.6. Calcul de la surface angulaire d'un objet paysager

5.4. Constitution de l'information sur l'occupation du sol

L'occupation du sol intervient à trois moments de la modélisation paysagère. D'abord pour définir la nature des objets qui composent le paysage (bâti, réseaux, végétation etc.), ensuite pour caractériser la disposition de ces objets au sol selon différentes configurations (éléments denses ou épars, taches de formes variées, indentées, étirées ou compactes etc.), enfin pour établir les hauteurs de sursols quand le MNE fait défaut. En outre, le fait de travailler simultanément avec des bases aux résolutions différentes amène à utiliser des sources adaptées à chaque échelle en termes de géométrie et de thématique. Les sources disponibles peuvent se classer en quatre types : les levés photogrammétriques, les cartes topographiques à grande échelle, les bases de données constituées, les images satellitaires et photographies aériennes.

5.4.1. *Les levés photogrammétriques*

Ceux-ci renseignent simultanément les objets et leurs volumes, à grande échelle. *A priori*, ils constituent la meilleure source de données, mais leur mise en œuvre se heurte pourtant à plusieurs difficultés :

- un coût élevé, en particulier pour de grandes superficies ;
- de gros volumes de données, difficiles à gérer en bloc pour l'analyse du paysage ;
- une précision parfois illusoire, par exemple : un jardin est une surface composite où s'assemblent des volumes élevés et bas, des masques plus ou moins transparents selon la saison, etc.

5.4.2. *Les cartes topographiques à grande échelle*

Un bon exemple de ce type de documents est donné par la couverture au 1/25 000^e produite par l'IGN et maintenant intégrée dans les bases numériques, BD_CARTO et BD_ALTI. Ces cartes présentent simultanément de bonnes qualités géométriques et une grande richesse thématique avec toutefois quelques inconvénients :

- la représentation symbolique des éléments linéaires ou ponctuels conduit à des aberrations d'échelles (une route de 1 millimètre de large sur la carte ne fait pas 25 mètres de large sur le terrain, et il en va de même pour les maisons) ;
- les cartes voisines sont mises à jour selon des rythmes très différents, ce qui conduit à de forts hiatus aux limites des coupures ;
- la définition thématique reste faible sur plus d'un thème (ainsi, pas de distinction entre forêts de conifères et forêts caducifoliées ; de même le territoire agricole est représenté de façon uniforme, sans distinction des prés ou des cultures).

5.4.3. *Les bases de données constituées*

Des bases de données sur l'occupation du sol sont déjà constituées et disponibles. Toutes ne se prêtent pas à l'exercice : certaines ne représentent qu'une partie du territoire (exemple : *l'Inventaire forestier national*, IFN), d'autres procèdent par échantillonnage et ne sont significatives qu'au niveau de grands agrégats (exemple : *Enquête sur l'utilisation du territoire*, Teruti), d'autres encore ne fournissent pas le niveau thématique souhaité (exemple : la couche « habillage » de la BD_CARTO de l'IGN). La base européenne *Corine Land Cover* (CLC), produite par l'Institut français de l'environnement (IFEN) et l'Agence européenne de l'environnement (EEA), constitue une bonne alternative à petite échelle, soit au 1/100 000^e. Sa richesse thématique et son homogénéité spatiale en font une

ressource de choix pour mettre en place les données à basse résolution. CLC pose toutefois le problème d'une nomenclature où beaucoup de types désignent des formes hétérogènes d'occupation du sol (« urbain discontinu », qui indique que le bâti n'est pas la seule forme d'occupation du sol, ou « territoires agricoles avec présence de végétation naturelle importante »). Le *référenciel à grande échelle* (RGE) de l'IGN est un produit récent et encore incomplet dans sa couverture ; il intègre quatre composantes dont les données sont en précision métrique ou décimétrique : orthophotographie, topographie avec définition des objets en volume, parcellaire, adresse (localisation des adresses postales et des noms de voie).

5.4.4. *Les images satellitaires et photographies aériennes*

Celles-ci offrent de larges couvertures spatiales observées de façon instantanée, et peuvent être parfaitement géoréférencées. Toutefois, ces atouts sont contrebalancés par quelques contraintes :

- les capteurs à haute résolution œuvrant sur de vastes couvertures (SPOT P, IRS P) ne donnent que peu d'information thématique (mode panchromatique mono-bande), et les capteurs à forte capacité thématique (SPOT XI, Landsat TM) n'offrent qu'une faible résolution spatiale. Ce problème peut être résolu en utilisant des complémentarités entre instruments, qui permettent, sous conditions de dates d'observation suffisamment rapprochées, d'améliorer la résolution spatiale des images à forte résolution thématique en les fusionnant avec les images à forte résolution spatiale ;
- les dates d'acquisition conditionnent fortement le potentiel de reconnaissance thématique de chaque image. En général, la période optimale correspond à la fin de l'été (distinction entre cultures et prairies, entre feuillus et conifères). Toutefois, la couverture nuageuse ne permet pas l'obtention d'images utilisables pour toutes les fins d'été ;
- les images satellitaires fournissent une information sur l'intensité du rayonnement électromagnétique réfléchi par la surface terrestre ; elles n'indiquent pas directement des types d'occupation du sol. Il est donc nécessaire de procéder à un travail de reconnaissance thématique, par classification ou segmentation, qui permet peu à peu d'identifier les objets pertinents ;
- pour être efficaces, ces instruments n'en sont pas pour autant universels, et il est parfois impossible de différencier certaines surfaces (des champs récoltés et des toitures de hangars), de repérer certains éléments (une route en sous-bois), ou de lever certaines incertitudes (des feuillus sur un versant au soleil donnent la même image qu'une prairie plate). Il est donc généralement nécessaire de faire appel à des données extérieures (BD_CARTO et BD_ALTI de l'IGN) pour affiner la reconnaissance thématique.

5.4.5. Les données spécifiques

Selon les applications, il est parfois nécessaire de compléter l'occupation du sol par des informations spécifiques pour affiner certains points de l'analyse en rapport avec l'objet d'étude. Ce sera, par exemple, le cas de sites et monuments remarquables ou, au contraire, de sites industriels générateurs de nuisances ou de risques dont on cherchera à mesurer l'impact paysager [HOW 93]. Certains objets comme les pylônes de transport d'électricité, peuvent même requérir une modélisation propre, concernant leurs caractéristiques visuelles de couleur ou de transparence, à mettre en rapport avec les paysages d'arrière-plan [COU 01].

5.5. Constitution de l'information sur le relief

Le modèle numérique de terrain (MNT) constitue la seconde source d'information indispensable pour modéliser le paysage. Il permet d'abord d'en reconstituer l'armature physique telle qu'elle s'inscrit dans le volume scénique. Ensuite, en utilisant des algorithmes appropriés, la structure du paysage peut être caractérisée par de nombreux termes ou indices morphométriques comme la pente, l'encaissement, l'orientation, l'ensoleillement (mesure de l'énergie théorique incidente), la fragmentation. Les formes elles-mêmes peuvent faire l'objet d'une reconnaissance automatique : ligne de crête, sommet, thalweg, cuvette, versant court, versant long, col etc. Associées aux modèles de visibilité, ces informations sur le relief et sa structure aideront à faire ressortir les zones donnant à voir tel ou tel type d'objet ou de configuration topographique. On trouvera quelques exemples de ce type de traitement dans les chapitres qui suivent (voir chapitre 7 et, surtout, chapitre 9).

Les sources disponibles se multiplient et quelques sites Web proposent même, en téléchargement libre, des fichiers d'altitude qu'il est possible de récupérer au format matriciel requis. Ces données ont, certes, un intérêt pour caractériser, en première approche, le paysage par grands ensembles mais les plus grandes précautions s'imposent lorsqu'il s'agit de les utiliser à des fins opérationnelles. Sur le territoire français, l'IGN fait référence comme fournisseur de ce type de données, notamment la BD_ALTI qui comporte différentes résolutions de MNT allant de 50 à 250 mètres avec des valeurs d'altitude données au mètre. Cette base offre la précision qui convient à bon nombre d'applications. À partir des fichiers initiaux, il est possible de dériver des MNT dont on modulera la géométrie en fonction des besoins. Ce sera le cas en modélisation du paysage, pour mettre en cohérence géométrique les données d'occupation du sol et de relief car les unes et les autres doivent avoir la même résolution avant d'être couplées. Pour affiner les résolutions, on procédera par interpolation (ajustement de polynômes locaux) ; pour obtenir des résolutions plus grossières, on procédera par agrégation. Le changement d'unité de mesure de l'altitude est également requis quand on procède à l'interpolation, passant du mètre

au centimètre. Cette transformation permet d'éviter les seuils de décrochement entre pixels qui se traduisent par un effet de « marches d'escalier » sur les cartes de visibilité quand on affine la résolution en gardant le mètre comme unité de mesure. Toutefois, il faut souligner que l'amélioration de la résolution par interpolation n'est qu'un artifice technique pour assurer la cohérence des données, sachant que la précision effective reste celle de la source. C'est pourquoi, en vue d'applications très spécifiques comme l'évaluation d'impact d'ouvrages par exemple, il sera nécessaire de constituer des modèles numériques plus précis, décimétriques en résolution, et centimétriques en altitude. Les ressources techniques que nous avons déjà évoquées (photogrammétrie, radar, lidar) existent en la matière mais les contraintes qui pèsent sur l'acquisition de ce type de données, en limitent pour l'instant l'utilisation à certaines catégories d'acteurs territoriaux comme les grandes agglomérations ou les opérateurs de grandes infrastructures. Quand la surface à couvrir reste modeste, le GPS offre une alternative pour constituer des MNT de grande précision [BRO 98B].

5.6. Spatialisation des indicateurs paysagers : ampleur de vue et soumission à la vue

Les figures 5.7 et 5.8 fournissent un exemple de restitution cartographique des deux termes fondamentaux de la visibilité que sont l'ampleur de vue et la soumission à la vue. Ces documents sont extraits d'une étude conduite dans le cadre d'un projet Natura 2000 sur la haute vallée de l'Aube dont un segment est montré ici². Comme ce secteur est relativement réduit, donc sans contrainte pour les temps de calcul, le travail a été affectué grâce à une seule base de données à 10 mètres de résolution. L'occupation du sol a été obtenue d'une image Spot classée tandis que le MNT résulte d'une interpolation des données de la BD-ALTI à 50 mètres de résolution initiale.

La carte d'ampleur de vue (figure 5.7) se calque assez fidèlement sur la structure morphologique du secteur. Le réseau hydrographique que forme la vallée de l'Aube et ses affluents est mis en évidence par l'ampleur relative des dégagements visuels qu'il offre. En effet, il s'agit de vallées à fond plat assez vigoureusement encaissées dans un plateau couvert de forêt. Le plancher alluvial qui héberge les villages est occupé par des prés et des cultures qui libèrent la vue en enfilade, sur la vallée et les versants encadrants. C'est pourquoi cet ensemble regroupe l'essentiel des fortes valeurs de visibilité. Sur les versants, la situation est plus complexe. On y retrouve des valeurs fortes, notamment aux abords des confluences où les vallées s'épanouissent davantage et où les prairies remontent sur les versants. En revanche, quand la vallée se resserre, les côteaoux se redressent et se couvrent de forêt, parfois jusqu'au pied. Dans ce cas, le potentiel visuel des versants et de leurs chanfreins

2. Cette étude a été réalisée pour le compte de l'association départementale pour l'aménagement des structures des exploitations agricoles de la Haute-Marne (ADASEA 52).

sommitaux, *a priori* important en raison d'une situation topographique favorable, est bloqué par les arbres qui font masque. Quand au plateau, uniformément couvert de forêt à quelques menues clairières près, il est bien repérable sur la carte en raison du confinement visuel total qui le caractérise.

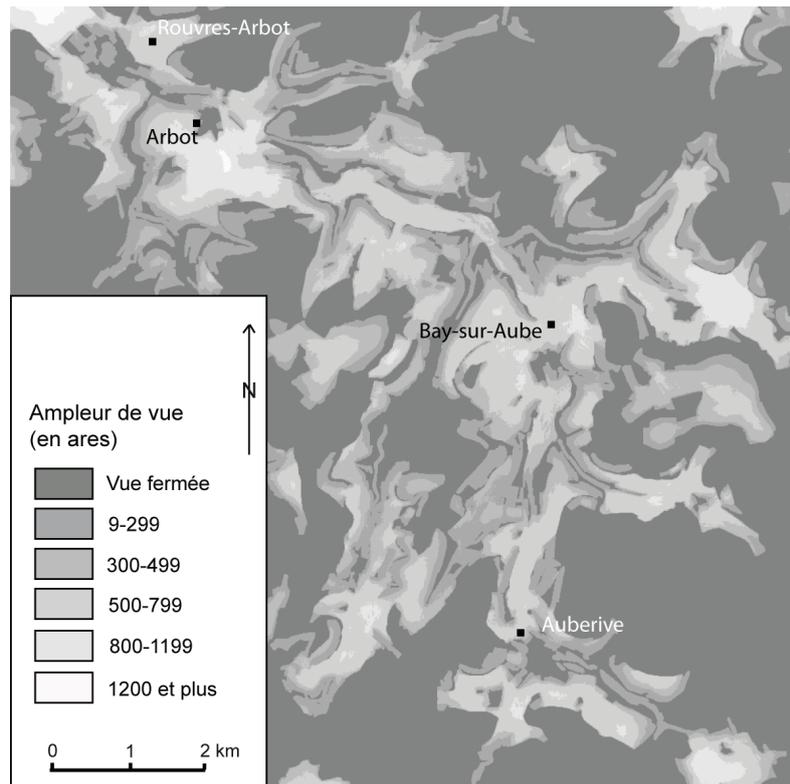


Figure 5.7. Ampleur de vue globale

La carte de soumission à la vue (figure 5.8) garde une structure d'ensemble analogue à la précédente, organisée par le binôme vallée-plateau. Cependant, les zones de soumission relativement forte se sont considérablement dilatées gagnant les versants et débordant assez largement sur le plateau où ne subsistent que quelques taches résiduelles non visibles. La dissymétrie qui peut exister entre les deux termes de la visibilité est très marquée ici. En effet, les espaces forestiers, qui n'offraient aucune vue sur la carte précédente, sont susceptibles maintenant d'être vus depuis les fonds de vallées et les versants dégagés.

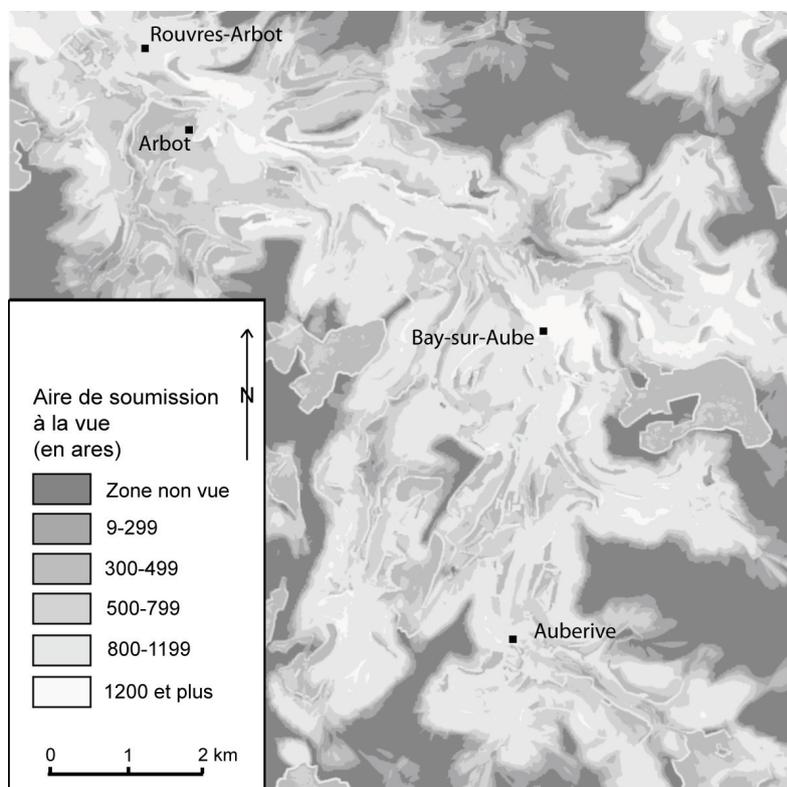


Figure 5.8. Soumission à la vue globale

5.7. Confection d'indicateurs thématiques

Les indicateurs de visibilité globaux sont à compléter par des indicateurs thématiques qui se déclinent également en termes d'ampleur et de soumission [BRO 98A]. Dans le cadre de l'étude paysagère de la haute vallée de l'Aube, la rivière et ses affluents font l'objet d'une attention particulière et servent à illustrer la procédure dans ses développements thématiques.

Connaître l'ampleur de l'espace que l'on voit en parcourant les cours d'eau est une donnée intéressante pour l'aménagement. Une première manière de répondre à ce besoin consiste à reprendre la carte d'ampleur de vue globale (figure 5.7) à la croiser avec la carte du réseau hydrographique et à ne visualiser que les pixels concernés. Il s'agit d'une opération courante en SIG. La carte de résultats se réduit au filaire des cours d'eau ainsi extrait.

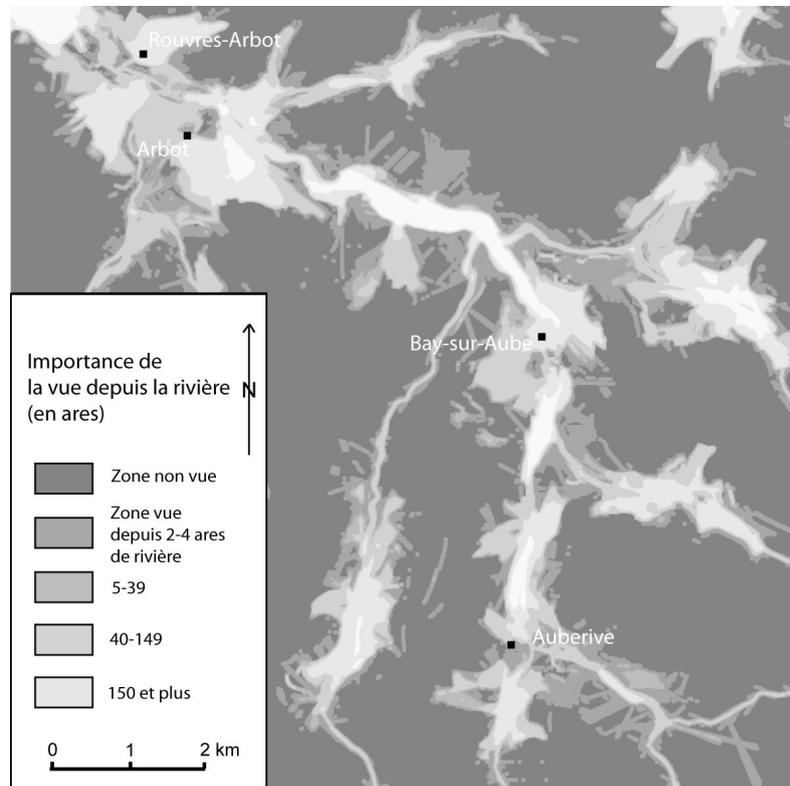


Figure 5.9. Ampleur de vue depuis la rivière

Ce type de restitution peut être utilement enrichie par celui que propose la figure 5.9. La procédure consiste à refaire le calcul depuis chaque pixel de rivière et à garder en mémoire, non la taille de l'aire couverte par la vue, mais la délimitation précise de celle-ci. De la sorte, l'on peut distinguer au sein du panorama d'ensemble que l'on a en parcourant la rivière, les zones qui restent en vue et celles qui sont plus furtives. Cette forme d'expression cartographique de l'ampleur de vue permet de repérer les « points d'appel » dans le paysage qui vont s'imposer au regard sur une partie plus ou moins grande du parcours. Cette information dont la fabrication repose sur des données statiques ouvre ainsi sur une mise en scène dynamique du paysage. Dans le cadre d'un aménagement touristique, par exemple, ces secteurs bien en vue pourront faire l'objet d'un soin particulier en termes de restauration ou pour éviter toute verrière ou pollution visuelles. La carte montre que les espaces qui ont une permanence forte dans le paysage le long du parcours, sont majoritairement proches des cours d'eau ; ce constat est contre-intuitif puisque l'on s'attend à ce que les éléments proches qui constituent les premiers plans, défilent et se renouvellent

rapidement alors que les plans lointains restent plus longtemps dans le champ. Il faut voir là, la traduction d'un effet de couloir lié à l'axe des rivières : la même portion de fond vallée peut être visible de loin et y rester à mesure qu'on s'en rapproche ; puis, une fois dépassée et qu'on s'en éloigne, cette même portion reste en vue encore longtemps avant de disparaître (n'oublions pas que l'observateur virtuel mis en action par la modélisation visite chaque arc de rivière en explorant du regard l'ensemble du tour d'horizon etc.) Par ailleurs, on observe que l'aire de visibilité offerte depuis les cours d'eau reste fortement contrainte par le cadre physique des vallées ; les échappées visuelles ne prennent quelque ampleur qu'à l'aval de la zone à la faveur d'un élargissement où convergent plusieurs vallées adjacentes.

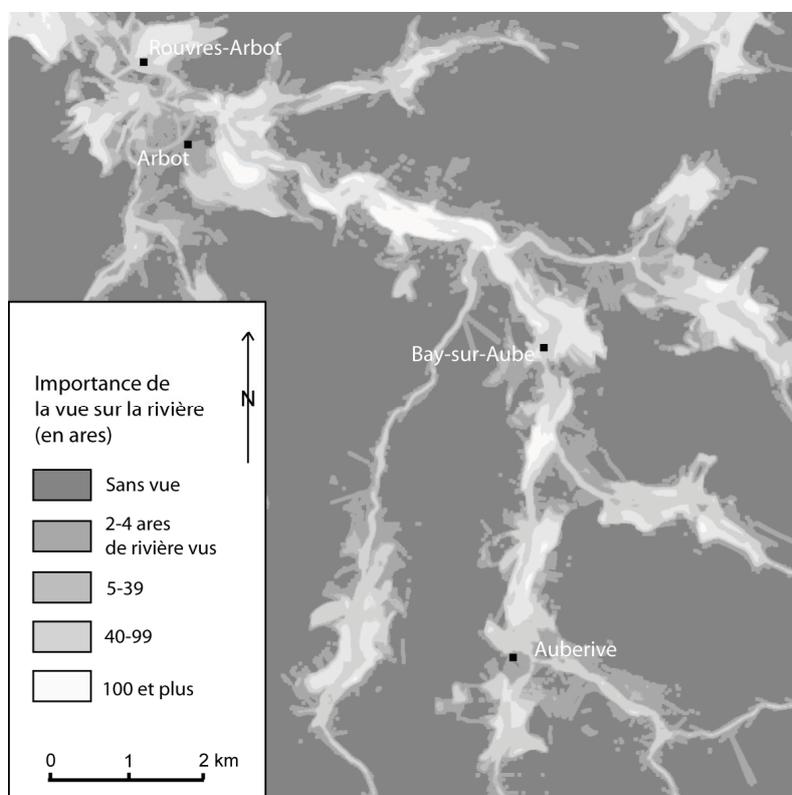


Figure 5.10. *Soumission à la vue de la rivière*

La figure 5.10 présente la carte de soumission qui répond à la question suivante : d'où voit-on les rivières ? Par rapport aux cartes de visibilité globale, la différence entre ampleur et soumission est beaucoup plus faible ; elle s'inverse même puisque

la rivière est encore moins vue qu'elle ne donne à voir. Ce constat relève en fait de la même explication : en raison du dégagement relatif de ses rives, la rivière donne un accès visuel aux versants encadrants même quand ils sont couverts de forêt alors que la réciproque n'est pas vraie.

5.8. Conclusion

Reprenant les bases conceptuelles et méthodologiques développées dans la section 1, ce chapitre présente les moyens requis pour passer à une approche instrumentée du paysage et de ses propriétés visuelles. La formalisation requise repose sur le couplage de deux grandes catégories primaires de données mises sous forme matricielle et relatives au relief et à l'occupation du sol. Des calculs trigonométriques appropriés permettent de déployer et de recomposer l'information dans le volume scénique, de l'analyser et d'en dériver des indicateurs chiffrés, archivés à leur tour sous la forme de plans d'information cartographiables. Les allers et retours entre 2D et 3D sont la caractéristique distinctive de l'approche du paysage proposée, à visée expérimentale et appliquée. En effet, malgré son caractère réducteur, elle permet une exploration systématique du paysage, reproductible sans distorsion sur de vastes ensembles spatiaux. C'est un avantage indubitable pour aider à la décision en matière d'aménagement et de gestion du paysage et du territoire. Cela étant, un certain nombre de contraintes pèsent sur la modélisation du paysage ainsi conçue ; nous avons défini les principales d'entre elles.

Les problèmes d'échelles sont essentiels et méritent d'être considérés avec soin. La précision de l'information visuelle se module en fonction de la profondeur de champ en termes géométrique (résolution, élévation) et thématique (nomenclature de l'occupation du sol), c'est pourquoi, il est proposé de travailler simultanément sur des bases différentes pour reconstruire le paysage en volume. Des bases en haute résolution et affinées thématiquement sont requises pour traiter les plans visuels proches tandis que des bases en basse résolution, agrégeant les thèmes d'occupation du sol par grandes catégories, servent à reconstituer les lointains. En outre, ce mode opératoire, complété par une procédure d'échantillonnage du tour d'horizon, permet de comprimer fortement les temps de calcul et de parcourir point à point, l'espace matriciel dans sa maille la plus fine.

La hauteur des sursols qui déterminent des masques dans le paysage est un autre point d'achoppement. La meilleure solution est de disposer de modèle d'élévation qui, en complétant le MNT, permet de reconstituer le détail des hauteurs de sursol. A défaut et pour des raisons de coût et de faisabilité, une alternative acceptable consiste à affecter une hauteur standard à chaque catégorie d'occupation du sol avec, au besoin, des règles permettant d'en restituer la variabilité d'une manière approchée.

Pour quantifier les caractéristiques visuelles du paysage globalement ou par catégorie, deux types de mesure sont à distinguer : la surface projetée qui consiste à mesurer, en unités de surface, l'emprise visuelle des éléments considérés après rabattement sur le plan de projection, tandis que la surface angulaire mesure directement la place occupée par ces mêmes éléments dans le champ visuel. Ces deux modes de quantification dont les résultats peuvent être confrontés, confortent les qualités expérimentales de l'approche numérique du paysage.

La mise en œuvre de ce dispositif instrumental requiert la constitution de bases de données dont la qualité doit être en accord avec les objectifs pratiques visés. Les sources d'information imposent un choix à bon escient ; les principaux repères ont été fournis sur les précautions à prendre pour constituer les bases, qu'il s'agisse de l'occupation du sol ou du MNT. En effet, les données fournies ne sont que rarement exploitables en l'état et nécessitent d'être prétraitées pour être prendre la forme requise en vue de la modélisation. Ces transformations portent tant sur la mise en cohérence géométrique que thématique de l'information.

L'approche du paysage qui est développée, revendique son inscription dans le champ scientifique de la géographie et se traduit surtout par la production de cartes donnant, en quelque sorte, à voir du dessus ce que l'on voit du dedans. Faire ressortir les caractéristiques structurantes du paysage et ses modes de différenciation dans la continuité de l'espace est l'objectif recherché, plus que de restituer la richesse paysagère sensible de lieux singuliers. A ce titre, quelques extraits d'applications ont montré comment certains déterminants de la réalité du paysage, comme l'ampleur de vue et la soumission à la vue, peuvent être transcrits sous forme de cartes globales ou déclinés par thème. Il convient d'ajouter que les documents en question ne constituent qu'une entrée en matière des ressources offertes pour mettre en évidence, par la carte, les propriétés visuelles du paysage.

Les éléments de formalisation qui ont donné corps à ce chapitre se sont attachés à saisir le paysage comme entité spatiale inscrite dans un jeu d'échelles, varié mais statique. Le chapitre qui suit vient compléter ce dispositif formel en abordant la dimension temporelle du paysage.

5.9. Bibliographie

- [ART 77] ARTHUR L.M., DANIEL T.C., BOSTER, R.S., «Scenic assessment : an overview», *Landscape Planning*, vol. 4, p. 109-129, 1977.
- [BIS 89] BISHOP I.D., LEAHY N.P.A., «Assessing the visual impact of development proposals: the validity of computer simulations», *Landscape Journal*, vol. 8, p. 92-100, 1989.
- [BIS 94] BISHOP I.D., HULSE D.W., «Prediction of scenic beauty using mapped data and geographic information systems», *Landscape Urban Planning*, vol. 30, p. 59-70, 1994.

- [BRO 95] BROSSARD T., JOLY D., LAFFLY D., VUILLOD P., WIEBER J.C., «Pratique des systèmes d'information géographique et analyse des paysages», *Revue internationale de géomatique*, vol. 4, n° 3-4, p. 243-256, 1995.
- [BRO 98A] BROSSARD T., JOLY D., WIEBER J.C., «Analyse visuelle systématique des paysages de cours d'eau par deux approches complémentaires», *Revue géographique de Lyon*, vol. 73, n° 4, p. 299-308, 1998.
- [BRO 98B] BROSSARD T., DESSERTY G., JOLY D., «Le GPS comme source de données géographiques à grande échelle, réalisation d'un test au Spitsberg », *L'Espace géographique*, n°1, p. 23-30, 1998.
- [BRO 99] BROSSARD T., JOLY D., «Représentation du paysage et échelles spatiales d'information», *Revue internationale de géomatique*, vol. 9, n° 3, p. 359-375, 1999.
- [BRW 94] BROWN T., «Conceptualizing smoothness and density as landscape elements in visual resource management», *Landscape Urban Planning*, vol. 30, p. 49-58, 1994.
- [COU 99] COUDERCHET L., JOLY D., BROSSARD T., «Protocole d'étude des paysages Définition dans le cadre des projets d'aménagements de lignes aériennes de transport d'électricité », Presses universitaires Franc-Comtoises, Besançon, 114 p, 2001.
- [GER 01] GERMINO M.J., REINERS W.A., BLASKO B.J., McLEOD D., BASTIAN C.T., «Estimating visual properties of Rocky Mountain landscapes using GIS», *Landscape and Urban Planning*, p. 71-83, 2001.
- [GOL 99] GOLDSTEIN R.A., NAGEL R., «3D visual simulation», *Simulation*, vol. 16, n°1, p. 25-31, 1971.
- [CRA 94] CRAWFORD D., «Using remotely sensed data in landscape visual quality assessment», *Landscape Urban Planning*, vol. 30, p. 71-81, 1994.
- [FIS 96] FISHER P.F., «Extending the applicability of viewsheds in landscape planning - Photogrammetric», *Engineering and remote Sensing*, vol. 62, p. 1297-1302, 1996.
- [GUS 98] GUSTAFSON G., «Quantifying landscape spatial pattern : what is the state of the art ? », *Ecosystems*, vol. 1, p. 143-156, 1998.
- [HOW 93] HOWES D., GATRELL A., «Visibility analysis in GIS : issues in the environmental impact assessment of windfarm developments», In Harts, J., Ottens, H.F.L., Scholten H.J. (Eds.), *EGIS93: proceedings of the fourth European Conference on geographical Information Systems*, vol. 2, p. 861-870, 1993.
- [LAN 94] LANGE E., «Integration of computerized visual simulation and visual assessment in environmental planning», *Landscape Urban Planning*, vol 30, p. 99-122, 1994.
- [ORL 94] ORLAND B., «Visualization techniques for incorporation in forest planning geographic information systems», *Landscape Urban Planning*, vol. 30, p. 83-97, 1994.