

Les métriques paysagères utilisées pour déterminer le prix des paysages

Mohamed Hilal^α, Jean Cavailhès^α, Thierry Brossard^β, Daniel Joly^β, François P. Tourneux^β, Pierre Wavresky^α



2èmes journées de recherches en sciences sociales

INRA SFER CIRAD

11 & 12 décembre 2008 – LILLE, France

^α INRA, UMR1041 CESAER, F-21000 Dijon, France.

^β CNRS UMR 6049 ThéMA, Besançon.

^α INRA, UMR1041 CESAER, F-21000 Dijon, France.

^β CNRS UMR 6049 ThéMA, Besançon.

Résumé

Cet article fait le point sur les métriques paysagères utilisées dans les évaluations économiques des paysages agricoles et forestiers. La diversité des indicateurs paysagers utilisés dans la littérature (occupation des sols, composition paysagère, distance à des biens paysagers, paysages vus : champ de vision, objets, formes) aboutit à des résultats parfois divergents. Après avoir fait le point sur cette littérature, nous présentons une modélisation numérique du paysage visible, croisant images satellite et modèle numérique de terrain. Combiné à un modèle hédoniste, estimé par différentes méthodes, ce modèle géographique offre la souplesse requise pour tester plusieurs métriques paysagères. Bien que celles-ci aient des effets importants sur l'estimation du prix d'un paysage particulier vu depuis une maison particulière, les prix hédonistes obtenus ont des valeurs moyennes assez voisines.

Introduction

La plupart des pays développés connaissent un mouvement d'extension des villes en direction des campagnes environnantes ou de zones rurales plus éloignées (Caruso, 2002), qui peut s'expliquer pour partie par la recherche de paysages ou d'un cadre de vie « vert ». « Open space is often cited as a primary attractor of urban and suburban residents to exurban areas located just beyond the metropolitan fringe » (Irwin et Bockstael, 2001). En France, Le Jeannic (1997) parle du goût pour « vivre dans un cadre naturel loin de l'agitation des villes, dans des maisons spacieuses et pourvues de jardins, tout en conservant la source de rémunération qu'est l'emploi en ville ». En effet, résider en milieu urbain ou périurbain résulte, pour les ménages qui ont à faire un tel choix, d'un arbitrage qui dépend à la fois de l'accessibilité à des bassins d'emplois et à des infrastructures culturelles et éducatives (écoles notamment) usuellement associés au tissu urbain et à des aménités environnementales et paysagères plus spécifiquement rurales.

La gestion de ces aménités, en particulier dans les villes et leurs ceintures périurbaines, est aujourd'hui une préoccupation des pouvoirs publics locaux (Clay et Daniel 2000 ; Davodeau, 2005). Pour les géographes, ce domaine de recherche est très documenté car ils s'associent souvent à des écologues, des urbanistes, des opérateurs publics pour mettre en évidence des critères qui fondent la valeur d'un paysage. De leur côté, les économistes s'attachent aussi à évaluer le prix des paysages et trouvent donc un intérêt à intégrer dans leurs modèles les résultats de l'approche géographique, à condition que celle-ci donne lieu à la production d'indices quantitatifs. Les systèmes d'information géographiques (SIG) constituent les outils indispensables pour y parvenir en faisant appel à des données numériques multi-sources caractérisant le paysage.

Les SIG permettent de produire une grande quantité d'indices relatifs aux différentes propriétés du paysage. Cet article propose de faire le point sur les métriques paysagères utilisées dans les évaluations économiques des paysages agricoles et forestiers. Dans la section 1, nous présentons les principaux résultats économiques obtenus dans la littérature en les ordonnant selon le type de métrique utilisée. Dans la deuxième section, nous montrerons comment, grâce aux SIG, il est possible de formaliser et quantifier les constituants du paysage dans leur diversité matérielle afin de produire des mesures d'une façon interactive et quasi-expérimentale. La section 3 permet de tester la robustesse ou la volatilité des mesures paysagères retenues en utilisant la méthode des prix hédonistes. Enfin, les résultats sont discutés dans la section 4.

1. Les indicateurs utilisés dans les travaux sur la valeur économique des paysages

Dans la littérature sur la valeur économique des paysages agricoles et forestiers, les indicateurs des attributs paysagers sont restés assez frustrés pendant longtemps. Ils se sont limités à trois types de variables : la couverture des sols (agriculture, forêt, etc.), analysée en deux dimensions à partir de cartes, de photos aériennes, d'images de satellites ; les indices d'écologie des paysages qui ajoutent aux précédentes des variables de forme ; la distance à des objets particuliers comme les terrains de golf, les jardins publics, les espaces verts, la forêt, etc., dans la mesure où la vue d'un paysage dépend de cette distance. Plus récemment, le recours à l'information géographique numérique autorise la construction d'indicateurs paysagers plus élaborés qui mesurent ce que l'observateur voit en intégrant la troisième dimension à l'analyse.

1.1. La couverture des sols

Les travaux qui reposent sur l'occupation du sol concluent généralement que la présence d'agriculture, de bois ou de forêts ont des prix hédonistes positifs. C'est ainsi que, parmi d'autres

auteurs, Des Rosiers et al. (2002) estiment que, près de Québec (Canada), la présence d'attributs paysagers (forêts, paysages jardinés, haies) fait augmenter le prix des logements de 7,7 % en moyenne. Cependant, d'autres auteurs obtiennent des résultats opposés, comme par exemple Garrod et Willis (1994), Irwin (2002), Palmer (2003), Smith et al. (2002) et Dumas *et al.* (2005).

Les résultats concernant l'agriculture sont également ambigus, car ils diffèrent selon les études. Roe et al. (2004) obtiennent un prix hédoniste positif, contrairement à Smith et al. (2002), alors que pour Paterson et Boyle (2002) l'effet n'est significatif ni dans un sens ni dans l'autre.

La couverture des sols est parfois analysée selon le statut juridique des terrains. C'est ainsi que des terres agricoles ou boisées qui risquent d'être ultérieurement construites (ce qui est plus souvent le cas de propriétés privées que publiques) dévalorisent les habitations proches alors que, inversement, une servitude de non constructibilité entraîne une plus-value (Irwin, 2002). Cheshire et Sheppard (1995) montrent qu'autour de Reading et de Darlington (Royaume-Uni) les espaces verts publics, ouverts à la promenade du public (parcs, forêts), ont des prix hédonistes positifs, alors que celui de terres agricoles, où l'on ne peut accéder, est généralement négatif.

Nous évoquons ici brièvement l'utilisation de méthodes de déclaration des préférences utilisant la théorie de l'utilité aléatoire (choix expérimentaux, analyse conjointe). Roe et al. (2004) montrent, par une analyse conjointe, que les riches valorisent la proximité d'agriculture plus fortement que les pauvres. Les premiers sont prêts à payer 6 % de plus un terrain résidentiel pour bénéficier de 10 % d'agriculture en plus, et les seconds 3 % seulement. Ces auteurs concluent également que l'agriculture joue un rôle attractif dans la suburbanisation et ils montrent qu'il y a substituabilité entre terres agricoles (qui ont une valeur esthétique et de non-usage) et parcs publics (qui ont, en plus, une valeur récréative). En France, Dachary-Bernard (2005) utilise aussi la méthode d'analyse conjointe dans une étude sur le parc naturel régional d'Armorique et elle conclut que les visiteurs sont prêts à payer pour voir une lande boisée.

Retenons que les résultats sur le prix d'occupation du sol arborés ou agricoles sont ambigus. Dans la majorité des cas, ces prix sont positifs, mais dans d'autres cas, en nombre non négligeable, ils sont négatifs. C'est paradoxal si l'on considère, comme nous l'avons dit en introduction, que ces cadres de vie verts sont recherchés. Ce paradoxe peut tenir au caractère frustré des variables d'occupation du sol, mesurées à partir d'une carte ou d'une image de satellite : ce ne sont pas des paysages à proprement parler. L'analyse mérite donc d'être affinée.

1.2. La composition paysagère et l'écologie des paysages

Pour aller au-delà de l'occupation des sols, les géographes utilisent souvent des indices repris de l'écologie du paysage, comme le nombre de taches par hectare, leur taille, la longueur des frontières entre elles, ou bien des indices synthétiques comme l'entropie ou la dimension fractale, ou encore des variables analysant les formes, la complexité ou l'uniformité qui s'en dégage, etc.

Ces travaux sont parfois conduits à partir de photographies. Par exemple, Palmer (2003) utilise les notes données par des personnes enquêtées à des photos de la région rurale et touristique du Cap Cod (Massachusetts, Etats-Unis). Il conclut que celles-ci valorisent l'eau, mais pas les forêts. Il montre aussi que les indices d'écologie du paysage n'ont pas d'impact significatif, à l'exception de la longueur des haies, qui est valorisée positivement.

Les images satellites sont la source de données la plus habituelle, depuis que l'écologie du paysage a fourni des variables de composition paysagère aisément calculables, que les économistes ont utilisé dans des modèles hédonistes. Geoghegan et al. (1997) ont été les premières, à notre connaissance, à utiliser ces variables pour estimer leur prix hédoniste. Elles montrent que dans le Maryland (Etats-Unis), près de Washington D.C., des forêts ou des champs proches accroissent

faiblement les valeurs foncières (leur effet est négatif au-delà d'une certaine distance). La fragmentation et la diversité du paysage ont un effet négatif, sauf près et loin de Washington.

En France, Dumas et al. (2005) estiment un modèle de prix hédoniste dans le département des Bouches-du-Rhône avec des variables d'occupation des sols et de composition paysagère. Un indice d'agrégation a un prix hédoniste positif, ceux d'interspection, de juxtaposition et d'entropie ont des prix négatifs.

1.3. La distance à des couverts agro-forestiers

La distance entre une maison et un objet a été intégrée depuis longtemps dans des modèles de prix hédonistes. Dès 1973, Weicher et Zerbst ont montré qu'à Columbus (Ohio, Etats-Unis) les habitations adjacentes à un parc bénéficiaient d'une plus-value, sauf en cas de trop forte fréquentation qui peut entraîner une moins-value.

Depuis les travaux se sont multipliés. Par exemple, à Portland (Oregon, Etats-Unis) Bolitzer et Netusil (2000) montrent que les logements situés à moins de 500 mètres d'un jardin public valent 1,5 % plus cher que ceux plus distants et que la proximité de golfs est davantage encore valorisée. Ils montrent, comme Weicher et Zerbst (1973), qu'une trop grande proximité a des effets négatifs, dus à la congestion et au bruit. Dans une région proche d'Helsinki (Finlande) étudiée par Tyrvainen et Miettinen (2000), le prix des maisons diminue de 5,9 % par kilomètre d'éloignement du parc forestier le plus proche.

La proximité et la surface de zones humides ont des prix hédonistes positifs dans la région de Portland (Oregon, Etats-Unis), comme le montrent Mahan et al. (2000) : un accroissement d'une acre de la zone humide la plus proche fait augmenter le prix immobilier de 24,4 dollars et en s'en rapprochant de 300 mètres, l'augmentation est de 440 dollars. La proximité de lacs est davantage valorisée (1600 dollars pour un rapprochement de 100 mètres).

D'autres résultats sont parfois surprenants. Smith et al. (2002) concluent que, dans la région étudiée de Caroline du Nord (Etats-Unis), l'éloignement d'un parc public a un effet positif sur le prix immobilier : il semble qu'on préfère être loin, ce qui est difficile à expliquer. Par contre, comme attendu, ce prix diminue lorsqu'on s'éloigne d'un golf et les parcelles adjacentes sont nettement plus chères que la moyenne.

Plusieurs des exemples précédents suggèrent que la distance doit être mesurée comme une variable discrète et non continue : il faut être adjacent à l'objet paysager d'intérêt. C'est ce que montre également Thorsnes (2002) sur le cas de lotissements du Michigan (Etats-Unis). Les biens qui jouxtent une forêt valent de 19 à 35 % de plus que les autres mais en revanche la forêt n'a plus d'effet sur le prix lorsqu'il faut traverser une rue pour l'atteindre. Hobden et al. (2004) obtiennent un résultat voisin pour une région proche de Vancouver (Canada) : les parcelles mitoyennes d'espaces verts valent 2,8 % de plus que la moyenne, et la plus-value monte, respectivement, jusqu'à 6,9 % et 11 % pour celles qui jouxtent des corridors et des sentiers piétonniers conduisant à de grands parcs.

La distance semble jouer un rôle différent selon le degré d'urbanisation, comme le montrent Anderson et West (2004) pour St Paul – Minneapolis (Etats-Unis) où, en banlieue, seules les distances aux golfs et à l'eau (lac, rivières) sont significatives alors qu'en ville la distance aux parcs ressort aussi positivement.

Retenons que la proximité d'espaces paysagés et aménagés pour des usages récréatifs (jardins publics, golfs, etc.) est valorisée, et que la contiguïté apporte généralement une plus-value supplémentaire, sauf si elle engendre des nuisances dues à une forte fréquentation. De plus, les effets de la distance sur les valeurs immobilières s'estompent rapidement, pour disparaître au-delà de quelques centaines de mètres.

1.4. La vue du paysage

La vue d'un paysage est une variable plus difficile à quantifier que les précédentes. Il faut passer d'une vision d'en haut (carte, photographie aérienne, image de satellite) à la vision qu'a un observateur depuis le sol. La photographie est utilisée depuis longtemps en ce domaine. Depuis quelques années, il est possible de modéliser le champ de vision depuis le sol grâce à des modèles numériques de terrain couplés à des images satellites. La topographie et/ou les masques visuels que constituent les objets disposés au sol sont ainsi pris en compte.

1.4.1. Petit retour sur l'analyse des préférences en matière paysagère

Pour étudier les préférences des agents en matière paysagère, de très nombreux auteurs ont mis en relation une série de notes données à des photographies de paysage et les caractéristiques paysagères de ces photos. Cette méthode de régressions multiples est semblable à une équation de prix hédoniste, mais c'est la note qui est la variable expliquée. Les conclusions de ces travaux, souvent anciens, ressemblent à un fouillis inextricable : Gobster et Chenoweth (1989), qui citent plus de 80 références, relèvent 1194 termes utilisés dans 50 articles pour décrire les préférences esthétiques.

Kaplan et al. (1989), souvent cités dans la littérature, expliquent une note donnée à des photos de paysages par quatre ensembles de variables : attributs physiques (pente, relief, contraste des bordures, diversité, etc.), occupation du sol, variables se rapportant aux sensations et, enfin, variables de perception (champ visuel, texture). Dans la zone rurale étudiée du Michigan (Etats-Unis), les attributs physiques expliquent mal la note, ce qui surprend les auteurs. Les pelouses arborées font augmenter la note, l'agriculture, les broussailles et les friches la font diminuer et les autres types (forêts, prairies) sont neutres. Le mystère d'un paysage a un effet positif sur la note ce qui est, selon les auteurs, un résultat classique.

Récemment, Kaplan et Austin (2004) montrent que, dans une région rurale près de Detroit (Etats-Unis), la vue de la nature depuis sa maison est l'élément le mieux noté, avant la demande d'espace (parcelle, surface habitable). D'autres travaux de ce type se distinguent par la méthode, comme ceux de Johnston et al. (2002) qui analysent l'aménagement d'un lotissement dans le Rhode Island (Etats-Unis) en présentant aux futurs habitants des plans et maquettes. Ils montrent que les ménages préfèrent un lotissement d'un seul tenant, de faible densité, avec des parcelles fragmentées et séparées par des haies.

1.4.2. L'estimation du prix de paysages vus

Bastian et al. (2002) ont utilisé une méthode de géographie quantitative pour reconstituer la vue d'un paysage des Montagnes Rocheuses (Wyoming ; Etats-Unis) et ils ont appliqué la méthode des prix hédonistes aux paysages ainsi modélisés. L'aire de vision d'un observateur est analysée sur 360°, à partir d'images satellites donnant la couverture du sol et d'un modèle numérique de terrain donnant le relief. Peu de variables paysagères sont significatives, à l'exception de la diversité des paysages, qui est hautement appréciée.

Paterson et Boyle (2002) utilisent également une image satellite et un modèle numérique de terrain pour analyser le paysage vu dans une région rurale du Connecticut (Etats-Unis). Ils obtiennent des résultats assez instables, en ce sens qu'ils diffèrent selon le type de variable (vision depuis le satellite ou depuis le sol), qui en outre sont parfois contre-intuitifs.

Cavailhès et al. (2006, 2007, 2008), Brossard et al. (2008a, 2008b) étudient le prix hédoniste de paysages vus dans le périurbain autour de Dijon et Besançon (France), avec une méthode qui permet de modéliser la vue depuis le sol (Joly et al., 2008). Ils montrent qu'au-delà de quelques

dizaines ou centaines de mètres, les plans de vision et les objets qu'ils contiennent n'influencent pas significativement le prix des maisons. Par contre, les arbres ou les champs proches vus depuis une maison ont des prix hédonistes positifs et les routes un prix négatif. La vue proprement dite compte, en ce sens que des arbres proches, mais dont la vue est masquée, ont un prix hédoniste plus faible que lorsqu'ils sont vus. Les indices d'écologie du paysage indiquent des prix positifs pour des formes paysagères complexes (mosaïques, non connectivité, etc.).

Les exemples précédents concernent des régions à caractère rural, plus faciles à analyser que les villes où la vue est difficile à modéliser, d'une part parce que les immeubles ont des hauteurs très variables et, d'autre part, parce que la qualité d'un paysage dépend d'autres éléments que la présence de champs ou de bois. C'est ainsi que, pour Glasgow (Royaume-Uni), Lake et al. (1998 ; 2000) ne peuvent déterminer le champ de vision grâce au seul modèle numérique de terrain : pour tenir compte de la hauteur des immeubles ils ont dû réaliser une visite de terrain pour compter le nombre d'étages, (en se limitant à un voisinage de 500 mètres, pour des raisons de temps). Ils montrent ainsi que la vue d'une route déprécie un bien immobilier de 2,5 %, indépendamment du bruit du trafic qui est pris en compte par ailleurs. Benson et al. (1998) ont également effectué des visites systématiques des maisons à Bellingham (Washington, Etats-Unis) pour déterminer la vue qu'elles offraient sur l'océan (et sur des lacs). Une full view sur l'océan fait augmenter de 68% le prix de maisons situées à moins de 0.1 miles, mais seulement de 31% si elles sont à plus de 2 miles.

Les progrès des Systèmes d'information géographique (SIG) permettent aujourd'hui d'automatiser l'analyse de données multidimensionnelles dans un environnement urbain complexe, comme le montrent Schaerer et al. (2008) pour Genève et Zurich (Suisse). Les auteurs prennent en compte l'effet sur le loyer de l'accessibilité, du bruit, de la pollution de l'air et de la vue. Cette dernière est modélisée dans un rayon d'un kilomètre grâce à un modèle combinant un modèle numérique de terrain à une couche d'information géographique sur la hauteur des immeubles. La proximité, l'accessibilité et la vue de certaines aménités paysagères (eau, environnement naturel, vue sur des montagnes) influencent positivement les valeurs locatives, ce qui n'est pas le cas d'autres attributs paysagers (effet négatif des jardins publics).

Retenons de cette brève analyse de la littérature, tout d'abord, que la vue proprement dite doit être introduite dans les modèles d'évaluation du paysage : l'occupation du sol vue du ciel est une approximation trop grossière, car la vision qu'en a un observateur est quelque chose de très différent. Ensuite, la résolution, ou l'échelle, doivent avoir une précision suffisante pour permettre de distinguer de petits objets ou de courtes distances, car ce n'est pas la même chose d'être adjacent, à quelques dizaines ou à plus d'une centaine de mètres d'un objet dont la taille et la hauteur comptent. On conçoit que ces exigences requièrent des méthodes géographiques sophistiquées. Ce niveau pertinent d'échelle, toujours très grand, explique peut-être pourquoi les travaux qui utilisent des variables définies à l'échelle de plusieurs centaines de mètres ou du kilomètre donnent des résultats volatiles, parfois contraires à l'intuition ou différentes d'une étude à l'autre. Enfin, l'information numérique couplée aux méthodes de la géographie quantitative permet aujourd'hui de construire des indicateurs élaborés du paysage, décrivant ainsi sa complexité et sa diversité. Pour autant, il n'en demeure pas moins que la réflexion conceptuelle sur la mesure doit se poursuivre afin d'identifier, à travers toute la diversité des indices et des variables, la valeur économique des attributs paysagers.

2. L'analyse quantitative du paysage

Le paysage, c'est « ce que l'œil embrasse d'un seul coup d'œil, le champ du regard » (Brunet, Ferras, Théry 1992). Vu depuis le sol, le paysage s'inscrit dans un volume où le jeu relatif de la topographie et des éléments qui la recouvre détermine une organisation visuelle faite de plans fuyants ou redressés, de perspectives lointaines ou rapprochées, de lignes continues ou brisées, de

taches de couleur fondues ou contrastées ; le paysage associe une forme matérielle, résultant de processus naturels, économiques ou sociaux, à une perception, celle d'un sujet-observateur qui appréhende son environnement du regard.

2.1. Aspects formels

2.1.1. Le concept de paysage

L'écologie, la géographie, l'histoire, la psychologie, l'économie et de nombreuses autres disciplines s'intéressent au paysage. Elles ont chacune une ou plusieurs définitions du paysage associées à des modes d'appréhension et d'analyse qui leur sont propres. Cependant, dans toutes les approches, les éléments caractérisant le paysage appartiennent autant à la nature qu'à la culture des hommes qui occupent l'espace ou l'ont occupé ; le paysage est à la fois objectif et subjectif, naturel et social, réel et symbolique.

Partant de ces constats, Brossard et Wieber (1980, 1984) ont établi un schéma conceptuel intégré du paysage en se référant à la théorie des systèmes. Selon ces auteurs, le paysage, inscrit dans la continuité de l'espace et du temps, se décompose en trois sous-systèmes interdépendants. Le paysage s'impose d'abord comme résultat matériel d'un **système producteur** où interagissent des composantes abiotiques (le monde minéral relatif au substrat et aux formes du relief), des composantes biotiques (le monde vivant, végétal et/ou animal) et enfin des composantes anthropiques (celles-ci procèdent évidemment du monde vivant mais elles constituent la trace explicite d'une action humaine). Le paysage constitue ensuite un **système visible** ; les éléments matériels issus du système producteur (objets abiotiques, biotiques ou anthropiques) s'agencent dans l'espace où ils composent un spectacle donné à voir à travers des formes visuelles. Celles-ci peuvent être décrites en terme d'ampleur et de profondeur de champ, en terme de couleur, de structure et de texture, elles-mêmes faites de taches, de traits et de points fondues ou contrastés. Enfin, le paysage se rapporte à un **système utilisateur** ; à ce titre, il est un spectacle pour quelqu'un, objet de perceptions sensorielles et de représentations mentales, construites individuellement ou collectivement et variables selon les groupes sociaux et leurs pratiques

2.1.2. Approches du paysage et évaluation

Ces références conceptuelles montrent que le paysage se définit à travers deux catégories de propriétés, objectives et subjectives nécessitant des approches distinctes.

- L'analyse des systèmes producteur et visible s'intéresse aux propriétés objectives du paysage qu'il s'agisse d'explorer ses aptitudes fonctionnelles (comme le fait par exemple l'écologie du paysage) ou de le considérer comme scène offerte à la vue (étude de la visibilité).

- L'analyse du système utilisateur s'intéresse au processus de représentation et d'interprétation qui donne du sens et donc de la valeur au paysage issu de la perception sensorielle (visuelle surtout). La représentation du paysage telle qu'elle se construit dans la conscience d'un individu-sujet induit des modalités d'intérêt et d'action pour le paysage qui peuvent être de différents ordres, esthétique, culturel ou utilitaire (Meitner 2004). C'est au travers de l'utilité retirée par les individus qu'il est possible d'appréhender la valeur du paysage (Arthur, Daniel et Boster 1977 ; Bishop et Hulse 1994).

Il n'y a pas d'étalon fixe ni absolu de la valeur d'un paysage, cependant, dans notre projet, l'évaluation du paysage opère à l'interface entre les deux domaines objectif et subjectif ; l'analyse géographique est requise pour expliciter les propriétés factuelles du paysage de manière à produire des indicateurs quantifiables et reproductibles. Ainsi mis en forme, ceux-ci sont destinés à être repris par l'analyse économique à qui il reviendra de déterminer la part significative qu'ils prennent

dans les prix constatés de transactions immobilières. Le prix est ici considéré comme un révélateur de la valeur accordée au paysage par ses utilisateurs.

2.2. Paysage et visibilité

Les objets géographiques disposés à la surface du sol peuvent être appréhendés visuellement selon deux types de point de vue, du dessus et du dedans (Rougerie et Beroutchachvili, 1991). En effet, l'angle et la distance de vue déterminent l'image sensorielle que l'on reçoit du paysage. La formalisation des rapports géométriques entre paysage et vue permet de distinguer trois notions à expliciter : le paysage cartographique « vu d'en haut », le paysage vu du dedans à travers, d'une part, un regard actif définissant « l'ampleur de vue » et, d'autre part, une vue passive définissant la « soumission à la vue ».

2.2.1. Le paysage vu d'en haut

Le regard vertical porté sur le paysage est celui que privilégie le géographe puisqu'il rejoint le point de vue cartographique qui lui est familier (Lacoste, 1986). Lorsqu'il est projeté sur un plan, l'ensemble de l'espace est accessible d'une manière équivalente en tous ses points. Il s'agit d'une commodité qui facilite la synthèse scientifique ou éclaire la prise de décision. Elle repose sur des critères de présence/absence ou de proximité/distance sans référence explicite à la perception (visuelle ou étendue à d'autres sens, ouïe, odorat...). Ce mode d'appréhension est repris dans beaucoup de travaux (Bastian et al. 2002). Par exemple, l'analyse écologique procède souvent par détection « du dessus » des configurations paysagères : corridors, lisières, écotones etc. (Forman et Godron 1981, 1986 ; Burel et Baudry 1999) ou des indices caractérisant les aptitudes écologiques du paysage : indices de compacité, de fragmentation, propriétés fractales etc.. Le plus souvent, l'évaluation économique des aménités paysagères, procède également par vue du dessus (Kestens, Thériault et des Rosiers, 2004 ; des Rosiers et al. 2002 ; Thornes, 2002 ; Tyrväinen et Miettinen, 2000 ; Roe, Irwin et Morrow-Jones, 2004). Cependant, nombre d'éléments paysagers présents ne sont pas visibles depuis le sol, ce qui nous amène à distinguer l'environnement paysager (appréhendé du dessus) et le paysage visible ou sensible (appréhendé du dedans) dont il est question maintenant.

2.2.2. Le paysage vu du dedans : l'ampleur de vue ou vu actif

Le paysage vu du dedans est celui qui se livre au regard de l'habitant, du promeneur ou de l'automobiliste (Franklin et Vogt, 2002). Chaque point de l'espace est caractérisé par l'ampleur de son panorama, appelé « vu actif ». La visibilité peut aussi être envisagée d'une manière sélective. Il s'agit alors de restituer l'espace vu depuis un point singulier ou depuis un ensemble fonctionnel (Howes et Gatrell, 1993), tel que réseau routier, zones bâties, etc. (Lee et Stucky, 1998). Poursuivant la même logique, on peut circonscrire l'espace couvert par le regard selon que l'on chemine dans un sens ou dans l'autre d'un sentier pédestre ou d'une voie navigable par exemple (Brossard, Joly et Wieber, 1998).

2.2.3. Le paysage vu du dedans : la soumission à la vue ou vu passif

Le « vu passif », ou soumission à la vue, correspond à l'opération inverse. Chaque point de l'espace est caractérisé par l'ensemble des lieux d'où il est vu. Cet aspect est tout particulièrement mis en avant lors des études d'impact visuel d'ouvrages tels que pylônes de transport d'électricité (Brossard et al., 1997; de Floriani, Marzano et Puppo, 1994) ou éoliennes par exemple (Benson et al., 2004 ; Kidner et al., 1999). Dans le cas de l'évaluation du paysage faite à partir du prix observé de transactions immobilières, on cherchera à déterminer, sur le réseau routier par exemple, les

tronçons à partir desquels chaque lieu de transaction est visible, donc soumis à la vue. On pourra vérifier ensuite si cette caractéristique a une incidence (a priori négative) sur le prix.

Voir et être vu seraient symétriques si l'altitude seule était prise en compte. Dans ce cas, si A voit B, B voit A nécessairement. Cette symétrie n'est plus vérifiée si l'on fait intervenir la hauteur des objets qui se surimposent au relief. Par exemple, un observateur A qui parcourt un fond de vallée dégagé, voit bien les versants encadrants recouverts d'arbres et embrasse ainsi un large panorama. A l'inverse, un observateur B qui évolue sous le couvert arboré des versants ne voit que son environnement immédiat limité par les troncs proches. Dans ce cas A voit B (ou du moins la portion d'espace où il évolue) mais B ne voit pas A. Il convient donc de bien distinguer les deux notions.

2.2.4. Le « vu sélectif »

La quantification globale de l'intervisibilité mérite d'être précisée par le « vu sélectif ». Ainsi peut-on restituer les espaces vus depuis un point singulier ou depuis un même ensemble fonctionnel : réseau routier, zones bâties, points de transaction immobilières, etc. Poursuivant la même logique, il est possible d'affiner les procédures pour faire apparaître l'espace couvert par le regard selon que l'on chemine dans un sens ou dans l'autre d'un sentier pédestre ou d'une voie navigable par exemple. L'exercice peut se prolonger en portant sur le contenu visuel des paysages ; ainsi, les cartes produites constituent une réponse aux questions du type suivant : d'où voit-on de la forêt, des corniches en abrupt, des cours d'eau, de la ville etc. ? Quel est l'impact visuel d'une autoroute, d'un lotissement, d'un ouvrage d'art (Brossard et al., 1997) ?

Grâce à la forme numérique de l'information traitée, les différents termes d'analyse que nous venons d'évoquer peuvent donner lieu à la fabrication d'indices quantitatifs caractérisant les propriétés paysagères de chaque point. L'information résultante est transcrite dans un tableau de données dont les variables sont les attributs paysagers exprimés sous forme d'indice, et les individus, l'ensemble des points coordonnés dans l'espace.

2.3. Modélisation numérique du paysage

2.3.1. Numérisation du paysage

Les SIG permettent de collecter, gérer et analyser de l'information géoréférencée sur de vastes zones. En couplant un modèle numérique de terrain (MNT) et un modèle d'occupation du sol issu d'images satellites, il est possible d'analyser le paysage grâce aux ressources de l'imagerie virtuelle (Brossard et Joly, 1999 ; Foltête, 2004). Les images ainsi créées simulent la vue d'un observateur localisé en chaque point de l'espace. En quantifiant la superficie vue et en la déclinant selon les types d'occupation du sol et selon l'éloignement, des indicateurs synthétiques sont produits : ampleur de vue, fermeture et ouverture visuelle, poids visuel de chaque type d'occupation du sol, diversité de composition du paysage. Enfin, les couches de données résultantes sont soumises à des traitements statistiques (typologies factorielles, analyse spatiale) qui permettent d'affiner la description du paysage et de ses propriétés visuelles (Brossard et Joly, 1999).

La mise en forme numérique du paysage voit son effet réducteur compensé par la capacité de la méthode à analyser de vastes étendues et à fournir des mesures objectives, quantifiées et géoréférencées des paysages.

2.3.2. Profondeur de champ et modèle d'information multi-échelle



Figure 1. Le paysage vu depuis un point donné



Figure 2. Une précision d'information différenciée par plans.

Noter l'écrasement des plans 2-3 et le déroulement en continu des plans 4 et 5, à gauche de l'image

La figure 1 fournit l'exemple d'un paysage donné à voir depuis un point dans une direction. Un assemblage panoramique permettrait de compléter le tour d'horizon. Ce paysage peut se décomposer en différents plans, figure 2, dont le contenu varie avec l'éloignement. En effet, au fur et à mesure que le regard gagne des plans lointains, il perd de son acuité et les objets de petite taille se fondent visuellement dans des objets plus étendus.

	Base source assignée au buffer	Résolution de la base	Limite minimale	Limite maximale	Surface (km ²)	Nombre de pixels
Buffer 1	1	7 m	0	70 m	0,015	316
Buffer 2			71 m	140 m	0,046	940
Buffer 3			141 m	280 m	0,18	3768
Buffer 4	2	30 m	281 m	1200 m	4,3	4772
Buffer 5	3	150 m	1201 m	6000 m	108,6	4828
Buffer 6	4	1000 m	6001 m	40000 m	4913	4912

Tableau 1. Paramètres géométriques et bases sources des six couronnes (buffers) concentriques définies autour des points de transaction.

Pour rendre compte de cette caractéristique de l'œil humain perdant de son acuité avec l'éloignement, nous utilisons simultanément plusieurs bases de données dont les résolutions vont croissant des plans proches aux plans lointains (Brossard et Joly, 1999). A cela s'ajoute un argument pratique déterminant : analyser en chaque point de l'espace toute l'étendue du champ visuel avec une seule base en très haute résolution allonge démesurément les temps de calcul. C'est

pourquoi, le modèle de visibilité que nous avons développé, considère autour de chaque point, des couronnes (ou buffers) de taille variable, reliées à des bases de données différentes dont la résolution est adaptée à l'éloignement. Ainsi, à chaque plan défini dans la profondeur de champ d'un paysage vu du sol (figure 2), correspond un buffer délimitant un segment d'espace dans une base de données (tableau 1). Techniquement, les données sont représentées en mode matriciel et structurées selon quatre niveaux de résolution, soit 7, 30, 150 et 1 000 mètres, et concernent l'occupation du sol et le relief. Le tableau 1 montre comment les six buffers concentriques, à partir desquels seront générés les plans visuels en 3D autour de chaque point, se raccordent aux quatre bases. Cette segmentation de la profondeur de champ en six plans, fait suite aux premiers retours d'expérience que nous avons eus et qui ont montré le rôle décisif des éléments visuels proches. D'où le réaménagement de notre protocole avec une ventilation affinée sur 3 buffers, de l'information tirée de la base à 7 mètres.

Les modèles numériques de terrain à 50 et 250 mètres de résolution initiale, issus de la BD-ALTI de l'IGN ont été utilisés pour constituer l'information topographique. Une procédure d'interpolation a été appliquée au MNT à 50 mètres pour produire les couches à 7 et 30 mètres tandis qu'une procédure d'agrégation a permis de dériver les couches à 150 et à 1 000 mètres des MNT initiaux à 50 et 250 mètres. L'altitude ainsi déclinée, selon 4 résolutions, sert à produire des d'indicateurs sur les structures paysagères, tels que pentes, orientation, formes ou indices topographiques, position encaissée ou dominante.

No	Base 1 7 x 7 m	Base 2 30 x 30 m	Base 3 150 x 150 m	Base 4 1 000 x 1 000 m
1	Eau	Eau	Eau	Eau
2	Résineux	Résineux	Résineux	Forêt
3	Feuille	Feuille	Feuille	
4	Buisson	Buisson	Buisson	
5	Culture	Culture	Culture	Champ
6	Pré	Pré	Pré	
7	Vigne	Vigne	Vigne	
8	Bâti	Bâti	Bâti	Bâti
9	Zone d'activité	Zone d'activité		
10	Route	Route	/	/
11	Carrière	Carrière	/	/
12	Voie ferrée	Voie ferrée	/	/
Total	12	12	8	4

Tableau 2. Types d'occupation du sol pour chacune des quatre bases

L'occupation du sol renseigne sur la configuration et la physionomie des paysages. La précision des nomenclatures et le nombre de catégories doivent être suffisants pour que les attributs du paysage puissent être discriminés. A l'inverse, le nombre de catégories doit rester limité, en sorte que chaque type soit suffisamment répandu pour autoriser une analyse statistique : l'objectif, rappelons le, n'est pas tant de reproduire la singularité du paysage propre à chaque lieu que de dégager des règles générales associant critères paysagers et prix des transactions. Il a donc fallu procéder à un ajustement de la précision thématique des bases en fonction de leur résolution (tableau 2).

Si 12 thèmes sont distingués pour les deux premières bases (buffers 1 à 4), on passe à 8 pour la base 3 (buffer 5) et à 4 seulement pour la base 4 (buffer 6) où ne restent que les thèmes majeurs identifiables dans les plans visuels lointains. Les quatre bases ainsi différenciées par leur résolution et leur précision thématique ont été construites à partir de trois sources d'information :

- la base européenne Corine Land Cover dont la précision spatiale et thématique est adaptée pour constituer les couches d'information à 150 et 1 000 mètres de résolution et qui comportent respectivement 8 et 4 types ;

- les images satellites, classées pour appréhender le paysage aux résolutions de 30 et 7 mètres, permettent d'affiner certains types, comme les formations ouvertes décomposées en cultures, prés et vignes et les formations arborées décomposées en feuillus, résineux et buissons. A cette fin, nous avons couplé les ressources de deux capteurs : le système ETM (Enhanced Thematic Mapper) embarqué sur le satellite Landsat 7, choisi en raison de sa richesse radiométrique favorable à la discrimination thématique, et le système IRS (Indian Remote Sensing), choisi en raison de la haute résolution de son canal panchromatique, qui a permis ainsi d'améliorer, par fusion, la précision spatiale d'ETM pour produire l'image à 7 mètres (Chavez, 1991) ;

- la base vectorielle BD_CARTO de l'IGN permet d'identifier, après conversion au format raster, des éléments linéaires comme les routes, les voies ferrées et les rivières ou encore des éléments ponctuels comme les carrières ou les zones d'activités. Ces thèmes sont difficiles à repérer par télédétection en raison de leurs caractéristiques géométriques (la continuité des réseaux est souvent rompue sur les images) ou de leur nature particulière (l'analyse d'image ne permet de distinguer ni les carrières des autres surfaces minérales ni les zones d'activités des autres surfaces bâties).

L'image recomposée de la figure 3 permet de contrôler son niveau de conformité avec la photographie de la figure 1, légitimant la mise en œuvre du protocole de test. En effet, la différence de calage des objets que l'on observe au premier plan ne remet pas en cause la conformité de la structure visuelle du paysage, définie et traitée en classes statistiques par la suite. Il convient de préciser que l'analyse du paysage procède par échantillonnage du tour du tour d'horizon selon des rayons partant de chaque point de prise de vue et espacés de 3 degrés, on ne traitera que les pixels ainsi recoupés. Associée au traitement simultané des quatre bases, cette technique contribue à réduire encore les temps de calcul et permet de réitérer la procédure d'analyse du paysage pour chaque point de la matrice spatiale à 7 mètres de résolution. Dans la phase de calibrage du modèle économique, cela n'est pas directement utile puisqu'on ne traite que les points de transaction.

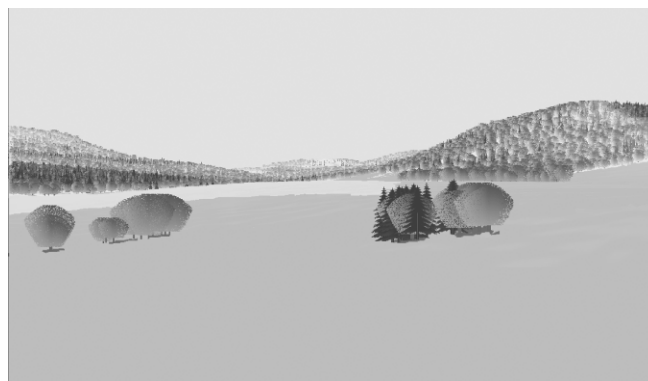


Figure 3. Image issue du croisement entre MNT et occupation du sol

2.3.3. Repérage des pixels vus

Les bases de données constituées et la modélisation retenue permettent de parcourir l'espace point à point d'une manière exhaustive et de recomposer d'une manière approchée le paysage tel qu'il s'offre à la vue d'un observateur placé en chaque point. Cette opération est rendue possible grâce aux solutions suivantes :

- La méthode des rayons divergents a été employée pour explorer le tour d'horizon par échantillonnage angulaire. Il s'agit de lancer des rayons de façon à explorer les 360 degrés du tour d'horizon autour d'un point d'observation. L'échantillonnage en question a été fixé de façon à trouver le meilleur compromis entre les contraintes liées au temps de calcul et le besoin de discriminer les objets fins en fonction de leur éloignement.

- Le long de chaque rayon, les pixels recoupés sont classés comme vu ou non vu grâce au calcul trigonométrique. Celui-ci tient compte des masques dus à la fois au relief et à la hauteur des objets qui composent l'occupation du sol (arbres, maisons, ouvrages). Les masques induits par les objets sont traités en affectant une hauteur standard au type d'occupation du sol correspondant. Les moyens techniques pour mesurer la hauteur effective des sursols existent mais ils restent encore complexes à mettre en œuvre et surtout chers à acquérir. Il n'était pas envisageable d'y avoir recours ici.

- La gestion de la précision de l'information en fonction de la profondeur de champ constitue un autre aspect décisif pour la qualité de la modélisation. Le travail de reconstruction trigonométrique du paysage à partir de l'information contenue dans les quatre bases en résolutions différentes a permis de lever cette difficulté technique. Ce recours à plusieurs bases, a induit la constitution de nomenclatures d'occupation du sol différenciées pour chacune: les divers types ainsi définis ont été identifiés, comptés le long de chaque rayon parcouru et finalement additionnés pour constituer les variables quantitatives qui sont à la base de l'analyse du champ de vision.

2.4. Les métriques paysagères calculées

La présence ou l'absence d'objets dans le paysage, l'angle, la distance de vue déterminent l'image sensorielle que l'on reçoit du paysage. La mise en ordre de l'information autour de chaque point de transaction, par couronnes concentriques et selon des nomenclatures d'occupation du sol distinctes, offre la souplesse requise pour tester plusieurs métriques relatives aux attributs du paysage. Les métriques retenues mesurent : la composition paysagère (nature et quantité d'objets présents dans le paysage et d'objets vu dans la scène paysagère) déclinée selon la profondeur du champ (couronnes de distance correspondant aux six plans de la scène paysagère) ; l'emprise visuelle mesurée par les surfaces angulaires des masques verticaux dus au relief et aux objets ; la surface des objets vus pondérée par leur distance à l'observateur.

2.4.1. Présence et abondance d'objets vus ou non vus selon la profondeur de champ

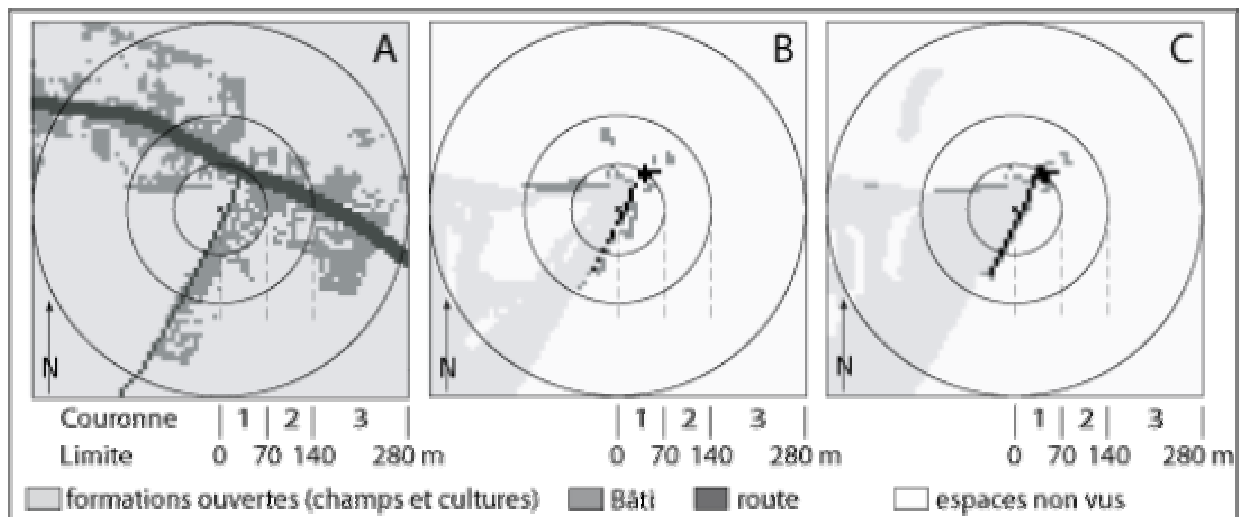
L'analyse en vue verticale est celle que privilégie en général le chercheur car c'est un moyen de couvrir d'un coup l'espace paysager dans son ensemble: géographes, écologues, économistes par exemple, appréhendent le plus souvent le paysage par détection du dessus pour en découvrir les configurations significatives: formes de relief, corridors, lisières, écotones, indices de compacité, de fragmentation, propriétés fractales, accès aux emplois, biens et services ou aménités etc.. De plus, la recherche a été fortement stimulée dans ce domaine par la généralisation des bases de données numériques et des systèmes d'information géographique qui fournissent les relais techniques

indispensables. Ce type d'analyse en vue zénithale est intégré dans notre approche même si la part d'innovation que celle-ci comporte ne vient pas de là.

La modélisation mise en place permet un inventaire des caractéristiques du paysage qu'il est possible de moduler en fonction des objectifs fixés. Pour tout point de la zone d'étude, il est possible de définir quelle est l'ampleur du panorama qu'il délivre à la vue ou s'il est fortement soumis à l'emprise visuelle du voisinage ; on détaille la façon dont le paysage s'organise dans la profondeur de champ, en vue ouverte vers l'horizon lointain ou dominée par des masques proches, etc. L'analyse se décompose aussi plans par plans en portant une attention particulière sur leur contenu : s'agit-il de cultures ou de forêts ou plutôt de constructions, de réseau routier, ou encore de plans d'eau ? L'organisation visuelle de ces objets se fait-elle en plages uniformes ou en mosaïques ? On peut ainsi multiplier à l'infini les hypothèses et les questionnements en essayant de faire le tour des critères qui sont susceptibles d'avoir une incidence sur le prix de l'immobilier. La modélisation et la mise en ordre formelle qu'elle sous-tend permettent de transcrire, sous forme numérique, ces différents termes de caractérisation du paysage. De la sorte, on peut choisir de leur trouver une expression visuelle sous la forme de carte ou de graphique ; on peut tout aussi bien les conserver sous leur forme numérique, puisque c'est ainsi qu'ils sont transférés comme variables explicatives pour être soumis à la modélisation économétrique.



orthophotographie



(a) vue du dessus : le regard zénithal (b) vue du dedans : ampleur de vue (c) vue du dedans : soumission à la vue

Figure 4. Les trois modes d'observation de la composition paysagère

Chaque point est environné par des éléments de paysages décrits en termes d'occupation du sol. Le décompte de ceux-ci permet d'en préciser la diversité et l'abondance. En (a), le paysage, donné

en vue zénithale, est totalement accessible au regard et retrouve la structure de l'orthophotographie malgré une résolution plus grossière. En (b), est reporté, sur le plan, le segment de paysage que voit, en trois dimensions, un observateur situé au centre des cercles; on constate que la plus grande partie du paysage environnant est masquée. En (c), sont figurés tous les pixels à partir desquels un observateur peut voir le point central. Les figures (b) et (c) ne se superposent pas: ainsi, «voir» et «être vu» sont deux termes complémentaires et non symétriques.

2.4.2. Surface angulaire liées aux masques verticaux

Le décompte des pixels vus, exprimé en surface offerte au regard, constitue un indicateur de l'ampleur visuelle des objets présents dans la scène paysagère. 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 carré, mais cette même plaine, telle qu'elle s'inscrit dans le volume scénique du paysage, est perçue avec une angle incident très faible qui en réduit l'importance panoramique à un liseré étroit juste au-dessus de la ligne d'horizon. À 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 « d'angle solide » qui donne lieu au calcul de surfaces angulaires restituant l'impact visuel des composants paysagers (Germino et al., 2001). La surface angulaire s'obtient en faisant le produit des composantes angulaires verticales et horizontales d'un masque en distinguant celui qui est du à la hauteur des objets (le bâti et les forêts) et celui qui est du à la hauteur du relief (l'altitude).

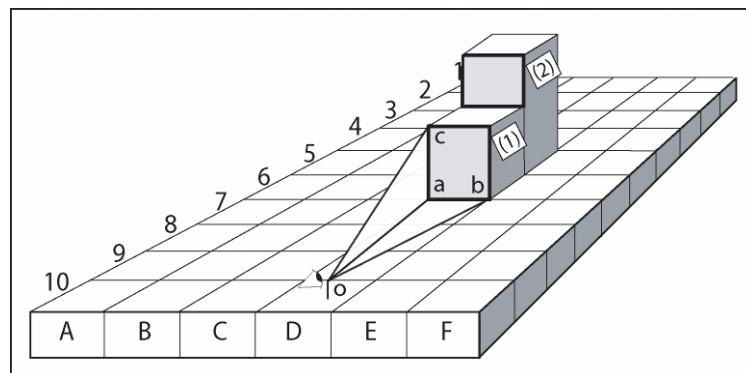


Figure 5. Surface angulaire des masques verticaux

La relation visuelle entre un observateur et un objet élevé (noté 1 sur la figure 5) peut être schématisée par une figure conique 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 de côtés ca et ab . L'angle $a\hat{o}b$ détermine l'angle solide horizontal et l'angle $a\hat{o}c$, l'angle solide vertical de l'objet en question. Le calcul du produit $a\hat{o}b \times a\hat{o}c$ correspond à la surface angulaire de celui-ci. Dans l'exemple de la figure 5 la résolution est de sept mètres. La hauteur de l'objet 1 est de 10 mètres et le pixel visé est situé à quatre pixels de l'observateur soit 28 mètres. Les angles solides $a\hat{o}b$ et $a\hat{o}c$ ouvrent respectivement à 14° et à $19,6^\circ$, ce qui permet d'attribuer à l'objet 1 une surface angulaire de 274 degrés carré. La procédure de calcul est réitérée pour calculer la surface angulaire de l'objet 2, partiellement masqué par le premier comme le montre le schéma.

La surface angulaire résultante pour un point d'observation donné est égale à la somme des surfaces angulaires établies pour tous les éléments qui composent son champ visuel.

Ainsi, à l'intérieur d'une zone bâtie où les maisons rompent immédiatement la vue, la surface couverte par le regard est minimale et se réduit au voisinage proche constitué des huit pixels

contigus au point de vision ; en revanche, en terme de surface angulaire, les valeurs calculées pour ce point sont très élevées. A l'opposé, certaines vues en plaine, par exemple, peuvent couvrir plusieurs centaines de kilomètres carré et n'offrir que des surfaces angulaires très faibles.

2.4.3. Distance aux objets vus

Pour chaque point d'observation singulier, ici des transactions immobilières, on peut extraire les pixels vus, leur type d'occupation du sol et leur distance au point d'observation. Ces données permettent de calculer en chaque point une distance « agrégée » de chaque type d'objets présent dans le volume scénique. Ce calcul ne peut être fait sans précautions. En effet, l'agrégation simple, qui consiste à faire la somme, pondérée par la distance, du nombre de pixels dénombrés dans chacun des plans, n'est pas adaptée. Si la définition des pixels est la même pour les trois premiers plans (en deçà de 280 mètres), elle change pour les trois derniers plans : les pixels ont 30 mètres de côtés entre 280 et 1200 mètres, 150 mètres de côté entre 1200 et 6000 mètres et 1 km de côté entre 6 kilomètres et 40 kilomètres.

Pour corriger cet effet, lié à la résolution des bases de données, chaque pixel vu a été pondéré par la taille qu'il occupe dans le champ de vision de l'observateur (les pixels des buffers 1 à 3 sont divisés par $7 \times 7 = 49$, ceux du buffer 4 par $30 \times 30 = 900$, etc.). En conséquence, cela conduit à calculer, pour chaque point d'observation et pour chaque type d'objets de la nomenclature d'occupation du sol, trois indicateurs de distance aux objets vus calculés comme la surface corrigée de pixel vu pondérée par la distance à l'observateur, la distance au carré et la racine carré de la distance.

3. Modèle économique, données et résultats

3.1. Modèle économétrique

L'application de la méthode des prix hédonistes aux biens immobiliers soulève plusieurs problèmes économétriques spécifiques, outre ceux qui peuvent exister dans toute régression économétrique (hétéroscédasticité des résidus, autocorrélations entre régresseurs, etc.). Nous omettrons ici ceux liés à l'estimation des paramètres de comportement des ménages (fonction de demande, élasticités de la demande), car nous n'avons pas procédé à la seconde étape de la méthode hédoniste, qui s'intéresse à cet aspect. Pour ce qui concerne la première étape à laquelle nous nous limitons, c'est-à-dire l'estimation de l'équation de prix hédonistes, les deux problèmes spécifiques principaux proviennent de corrélations spatiales entre les résidus et de l'endogénéité de certains régresseurs. Un postulat fondamental des méthodes de régression est violé lorsqu'un de ces deux «ennuis» se produit, interdisant d'utiliser la méthode des moindres carrés ordinaires.

Les autocorrélations spatiales entre résidus peuvent être dues à plusieurs causes, la principale étant l'existence de caractéristiques omises que partagent des observations voisines. Dans ce cas, les termes d'erreur du modèle ne sont plus indépendants. Nous prenons en compte ce problème à deux échelles: les liaisons spatiales entre les observations appartenant à des communes voisines (niveau inter-communal) et celles entre observations d'une même commune (niveau intra-communal). Au niveau inter-communal, nous savons que les observations d'une même commune partagent une politique foncière locale (imposition, zonage foncier), une qualité sociale du voisinage, une jouissance de biens publics locaux, une accessibilité aux marchés du travail, des biens et des services, la présence d'aménités, nuisances et externalités diverses. De plus, deux communes voisines ont souvent des caractéristiques différentes en ces domaines. Pour tenir compte de ces liaisons spatiales qu'il est impossible d'introduire dans une équation économétrique tant leur diversité est infinie, nous utilisons le modèle à effet fixe, en attribuant à chaque commune une variable indicatrice qui capte l'ensemble de ces caractéristiques omises. En procédant ainsi, les corrélations spatiales inter-communales sont éliminées. L'indice de Moran est ensuite calculé pour

tester l'existence de corrélations entre les observations appartenant à une même commune. Il est calculé avec une matrice de contiguïté où toutes les transactions distantes de moins de 200 mètres sont considérées comme voisines. Le test statistique indique que cet indice n'est pas significativement différent de zéro.

L'endogénéité de certains régresseurs provient d'un choix simultané par les ménages du prix du logement (variable expliquée) et de certaines variables explicatives. Par exemple, le ménage peut faire son choix en raisonnant simultanément sur le prix d'un bien et sur sa surface habitable (l'agrément d'une pièce supplémentaire justifie-t-elle de faire un effort supplémentaire sur le prix ?). Dans ce cas, cette variable explicative est corrélée au terme d'erreur, violant ainsi un autre postulat de la méthode économétrique. La solution habituelle est d'utiliser, à la place de cette variable endogène, sa projection obtenue par une équation économétrique auxiliaire où elle dépend d'instruments dont on s'assure de l'exogénéité. Nous utilisons cette «méthode instrumentale» qui permet de vérifier, par un test de Hausman, que la surface habitable des logements est endogène. L'estimation est donc réalisée en doubles moindres carrés après projection de la surface habitable sur des instruments (caractéristiques des acquéreurs et vendeurs). Le test de Sargan indique qu'il n'y a pas d'autre variable endogène.

3.2. Région d'étude et données

La région d'étude est située en Bourgogne (France), autour de l'agglomération de Dijon. La limite extérieure de l'aire est délimitée par un temps d'accès à Dijon inférieur à 33 minutes ou une distance routière de moins de 42 kilomètres. Sa limite intérieure est celle de l'agglomération dijonnaise, constituée de la commune de Dijon (149 867 habitants) et des 14 communes de la banlieue de Dijon (87 086 habitants). L'agglomération est exclue car les modèles d'analyse du paysage mis en œuvre dans ce travail s'appliquent mal aux espaces densément bâtis et à forte variabilité de hauteur d'immeubles. En revanche, ces modèles sont bien adaptés à l'analyse des paysages forestiers ou agricoles, ouverts ou fermés, dont l'évolution est dominée depuis une trentaine d'années par un mouvement de périurbanisation. Nous avons donc retenu 305 communes, définies dans la nomenclature statistique française comme périurbaines ou appartenant à l'espace à dominante rurale. Elles s'étendent sur 3 408 km² et comptent 140 703 habitants.

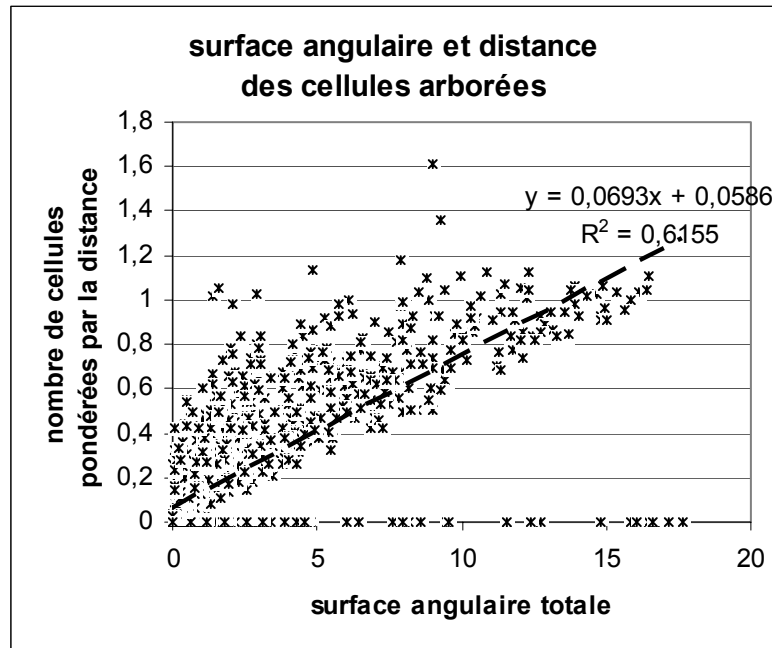
Les données immobilières utilisées proviennent de la base de données des notaires (PERVAL) et portent sur les années 1995 à 2002. Le choix des données a été fait de façon à disposer de la description la plus complète possible des caractéristiques structurelles des transactions (prix, surface, éléments de confort, qualités du vendeur et de l'acquéreur, etc.). Afin de localiser très précisément les transactions à l'intérieur du périmètre d'étude, chaque donnée a fait l'objet d'un traitement préalable permettant de lui attribuer ses coordonnées géographiques, exprimées en latitude et longitude. L'estimation économétrique dont nous présentons les résultats repose sur 2 665 observations.

3.3. Résultats économétriques

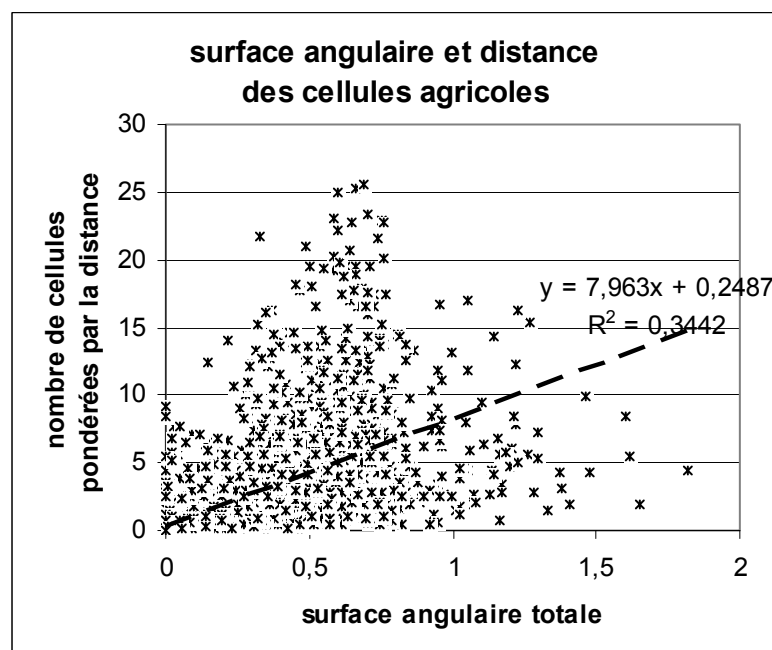
Les résultats relatifs aux attributs des logements et aux autres variables de localisation sont analogues à ceux obtenus dans nos autres travaux (Cavailhès et al., 2006, 2007, 2008 ; Brossard et al., 2008a, 2008b). L'objet de ce papier étant de tester les résultats obtenus en utilisant différentes métriques paysagères, nous ne présenterons que les résultats relatifs à ces variables.

3.3.1. Statistiques descriptives : les quantités de paysages vus selon la métrique

Les trois types de métriques paysagères conduisent à des mesures d'objets vus dont la grandeur diffère sensiblement. Le calcul des cellules vues selon les couronnes de distances n'est pas directement comparable aux deux autres métriques (angles solides et nombre d'objets de chaque type pondéré par la distance) car il faut faire intervenir six variables, une pour chaque couronne. Les angles solides et le nombre d'objets vus pondérés par la distance, qui sont résumés en une seule variable, sont plus directement comparables. Les résultats sont très différents, comme le montrent les figures 6a et 6b.



6a



6b

Figures 6a et 6b. Répartition des observations selon les surfaces angulaires (milliers de degré carré) et le nombre d'objets vus pondéré par la distance (en mètres) pour les surfaces arborées et agricoles

La corrélation entre surface angulaire et nombre d'objets pondérés par la distance, lorsqu'on la calcule pour chaque observation de l'échantillon, est de 0,62 pour les surfaces arborées et de 0,34 pour l'agriculture.

3.3.2. Nombre de cellules vus et non vues par couronne

Le tableau 3 présente les résultats d'un modèle à effets fixes estimé par les moindres carrés ordinaires -MCO- (colonne 1) et avec la méthode instrumentale en doubles moindres carrés -2SLS- (colonne 2), et un modèle mixte (colonne 3).

Résultats généraux. La surface habitable est endogène et le test de Sargan indique que les autres variables sont exogènes. Le modèle est homoscédastique et le test de l'indice de Moran, effectué sur les résidus voisins (inter et intra communaux) montre que ceux-ci ne sont pas spatialement autocorrélés. Les variables paysagères sont toutes exogènes, contrairement aux résultats obtenus aux Etats-Unis (Irwin, 2002 ; Irwin et Bockstael, 2001). Pour les trois estimations, ordres de grandeur des coefficients, signes et écarts-types sont assez proches. Le modèle mixte étant statistiquement moins sûr que le modèle à effets fixes estimé par les doubles moindres carrés, nous ne présentons que les principaux résultats de ce dernier.

Les résultats du tableau 1 montrent que les objets vus ou non vus situés au-delà de 70 mètres ont des paramètres non significatifs à deux exceptions près. La vue sur l'agriculture, située entre 70 et 280 mètres, a un effet positif sur le prix des biens. La vue sur les routes et voies ferrées a un effet négatif jusqu'à une distance de 280 mètres, cet effet étant beaucoup plus pénalisant que lorsque ces infrastructures sont présentes sans être vues. L'absence d'effet au-delà de quelques dizaines de mètres peut s'expliquer par le fait que la zone d'étude présente un paysage agro-forestier « banal » sans éléments remarquables particuliers comme une vue sur la mer, des cimes enneigées, etc.

Arbres, forêts et agriculture. La vue sur des arbres, bois ou forêts, situés à moins de 70 mètres d'une maison, fait augmenter son prix de 3 % pour un écart-type de surface supplémentaire vue. La vue sur les arbres est plus fortement valorisée que leur simple présence, la valeur du paramètre des arbres non vus étant trois fois plus faible que celle des arbres vus. En outre, la fragmentation a un prix hédoniste positif puisqu'une tâche supplémentaire de feuillus dans les 70 premiers mètres augmente de 1,4 % le prix d'une maison. La vue sur l'agriculture, située à moins de 70 mètres, n'est pas significative, mais la vue sur des cultures et prairies, situées entre 70 et 280 mètres augmente le prix hédoniste de 6,6 % par écart-type.

Réseaux de transport. La vue sur des routes et voies ferrées, situées à moins de 280 mètres, diminue le prix d'une maison de 1,3 % par écart-type. La présence d'infrastructures non vues à l'intérieur de ce rayon de 280 mètres n'a pas d'effet significatif sur le prix. Ce résultat confirme le rôle de la vue mis en évidence pour les arbres et l'agriculture : la présence d'un objet non vu n'a pas du tout d'effet ou moins d'effet que lorsqu'il est vu.

Bâti. Etant le type d'occupation du sol le plus fréquent autour des maisons, le bâti est omniprésent dans le paysage vu. Le prix hédoniste de la vue sur le bâti n'est pas significatif et cela quelle que soit la distance. Ce résultat peut s'expliquer par deux facteurs qui interviennent de façon opposée : la présence de maisons proches permet des relations de voisinage appréciées, mais leur vue est dévalorisée par rapport à celle de la verdure (arbres, buissons, prairie).

Variables de composition paysagère. Les résultats des variables de compositions paysagères utilisées séparément ou combinées à d'autres, montrent que la division des paysages, leur complexité ou leur fragmentation, les formes en mosaïque, etc. sont positivement valorisées.

	Ring	(1)	(2)	(3)	
		fixed-effect		Mixed	
		MCO	2SLS	location from Dijon	
TREES SEEN	< 70m	0.0053***	0.0057***	CLOSE FAR	0.0031 0.0073***
TREES SEEN* LOT/LSPACE	< 70m	-1.42E-4	-1.7E-4		-1.5E-4*
TREES UNSEEN	< 70m	0.0014***	0.0017***	CLOSE FAR	0.0015*** 0.0008*
TREES UNSEEN* LOT/LSPACE		-5.8E-5***	-6.0E-5***		-4.0E-5***
R TREES SEEN	70-140m	-3.0E-4	0.0010		0.00815
TREES SEEN	140-280m	-0.0013***	-0.0007		-0.0011**
R-BUSHES SEEN	< 70m	0.0493	0.0264		0.040
R-BUSHES SEEN	70-140m	0.1642*	0.2448**		0.1351*
R-BUSHES SEEN	140-280m	-0.0021	0.0854		-0.0122
R AGRI SEEN	< 70m	0.0281	-0.0130		0.0131
R AGRI UNSEEN	< 70m	0.0015	0.00043		9.4E-4
AGRI SEEN	70-280m	1.23E-4***	1.7E-4***	CLOSE FAR	0.0001*** 0.00012***
AGRI SEEN * LOT/LSPACE	70-280m	-0.0061***	-0.0064***		-0.0057***
AGRI SEEN * POSUD	70-280m	-2.4E-5	-5.0E-5*		-3.0E-5
AGRI UNSEEN	70-280m	4.0E-5***	3.6E-5***	CLOSE FAR	3.5E-5*** 3.5E-5***
AGRI UNSEEN * LOT/LSPACE	70-280m	4.0E-5***	-0.0020**		-0.0023***
AGRI+TREES SEEN	0.28-40km	3.9E-5	2.5E-5		5.1E-5
BUILT SEEN	< 70m	0.0015	0.00206		0.00128
R BUILT SEN	70-280m	0.0014	-0.0018		0.00126
R BUILT SEEN	0.28-1.2km	0.0172	0.00471		0.0356
NETWORKS SEEN	0-280m	-2.4E-4**	-0.0003**	CLOSE FAR	-0.0004** -0.0003*
NETWORKS UNSEEN	0-280m	7.1E-5	4.5E-5	CLOSE FAR	2.0E-5 0.00011**
R NETWORKS SEEN	0.28-1.2km	-0.1754	-0.2478		-0.159
WATER SEEN	0-40km	-0.0257	-0.0417**		-0.0324**
DECID EDGE		-3.2E-4***	-0.0005***		-0.0004***
DECID PACHES		0.0095***	0.0109***		0.0118***
AGRI PACHES		0.0022***	0.0025***		0.00172***
COMPACT		0.1584	0.2313*		0.1507
POPULATION					2.6E-5***
DISTANCE FROM DIJON					-0.0551***
(DISTANCE FROM DIJON) ²					0.00086***
INCOME					0.00002***

Level of significance : *** 1%; ** 5%; * 10%,

Tableau 3. Estimation des variables paysagères par couronne

3.3.3. Variables paysagères mesurées par des surfaces angulaires

Le tableau 4 présente les résultats des indicateurs de surfaces angulaires.

Les valeurs tests et les signes des paramètres sont cohérents avec les estimations utilisant les variables par couronnes ; la principale différence est liée à la signification de la forme quadratique utilisée dans certains cas. Lorsqu'un type de paysage est mesuré par sa surface angulaire, un effet de saturation survient, ce qui rend significatif le terme quadratique. Cela est particulièrement important pour les arbres : on sait que l'abondance d'arbres proches ferme l'horizon, et on comprend que ceci se traduise par une dépréciation du bien immobilier.

Avec le modèle à effets fixes estimé par variables instrumentales, le prix d'une maison, au point moyen, augment de 4,6 % par écart-type pour les arbres, de 3 % par écart-type pour l'agriculture (significatif au niveau de 10 %) ; il diminue de 1 % par écart-type pour les routes. L'eau, les buissons et le bâti ne sont pas significatifs. Les interactions entre les arbres ou l'agriculture et la taille du lot ont des paramètres significativement négatifs, comme dans le cas des variables par couronnes.

Au total, ces résultats sont cohérents avec les précédents. Or, les surfaces angulaires sont une mesure géographique très différente des couronnes de distance (même si elles utilisent les mêmes données de base) et il n'y a plus la colinéarité qui existait avec les couronnes. Le fait que les résultats obtenus par ces méthodes différentes soient voisins suggère que ces méthodes sont robustes.

	(1)	(2)	(3)
	fixed-effect		Mixed
	OLS	2SLS	
TREES SEEN	0.2707***	0.2677**	0.2897***
(TREES SEEN) ²	-0.0093	-0.0141**	-0.0124**
TREES SEEN*	-0.0098***	-0.0093***	-0.0087***
LOT/LSPACE			
AGRI SEEN	3.634***	2.5259*	1.9953
(AGRI SEEN) ²	-2.594*	-1.5940	-0.9521
AGRI SEEN *	-0.2492***	-0.2160***	-0.2007***
LOT/LSPACE			
AGRI SEEN * POSUD	0.2746	0.2433	0.1625
BUSHES SEEN	0.1340	-0.2957	0.0176
(BUSHES SEEN) ²	0.0812	0.2263	0.1517
BUILT SEEN	-0.0001	-0.0029	0.0550
NETWORKS	-1.878**	-1.6918*	-1.995**
WATER	2.765	-1.2531	0.0610
INDUSTRIAL ZONES	0.0330	0.0076	0.0571
POPULATION			0.0004***
DISTANCE FROM			
DIJON			-0.5076***
INCOME			0.0003***

Level of significance : *** 1%; ** 5%; * 10%,

Unit of measure: 10⁴ sr

Tableau 4. Estimations des variables de surfaces angulaires

3.3.4. Variables par distance aux objets

Les résultats, présentés dans le tableau 5, sont cohérents avec les précédents. Les couverts arborés ont un effet significatif positif sur les valeurs immobilières et leur interaction avec la surface des lots résidentiels est significativement négative, montrant une relation de substitution. Il en est de même pour le nombre de cellules agricoles vues et de leur interaction avec la taille du lot. La troisième variable paysagère significative est le nombre de cellules de réseaux. Comme précédemment, l'eau vue a un effet négatif qui reste contre-intuitif et inexpliqué. Le bâti et les buissons n'ont pas d'effet significatif sur le prix des maisons. Enfin, les quatre variables de composition paysagère ont, dans ces modèles comme auparavant, des effets significatifs avec les signes attendus.

	MCO		2SLS		Mixed	
	estimate	tstudent	estimate	tstudent	estimate	tstudent
TREES	0,09395	2,5	0,088386	1,9	0,09077	2,6
TREES* LOT/LSPACE	-0,00628	-3,8	-0,00636	-3,1	-0,00528	-3,4
AGRI	0,00576	3,2	0,005855	2,6	0,00437	2,6
AGRI * LOT/LSPACE	-0,000419	-5,7	-0,0004	-4,4	-0,00037	-5,2
BUSCHES	0,04775	1,7	0,028465	0,8	0,04033	1,5
BUILT SEEN	-0,0004747	0,0	-0,00941	-0,7	-0,00074	-0,1
NETWORKS SEEN	-0,01646	-2,9	-0,01357	-2,0	-0,01761	-3,3
WATER SEEN	-0,02504	-2,1	-0,03643	-2,4	-0,02967	-2,7
DECID_EDGE	-0,0001292	-1,6	-0,00029	-2,9	-0,00021	-2,7
DECID_PACHES	0,00983	3,5	0,010986	3,2	0,01163	4,6
AGRI_PACHES	0,00177	2,7	0,002008	2,5	0,001497	2,6
COMPACT	0,2174	2,0	0,291631	2,2	0,2034	1,9

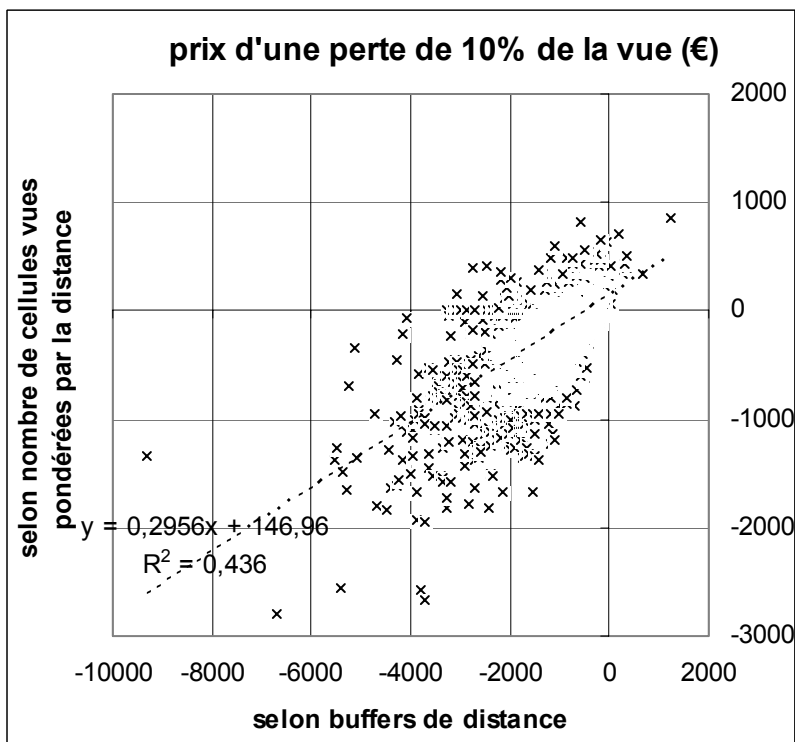
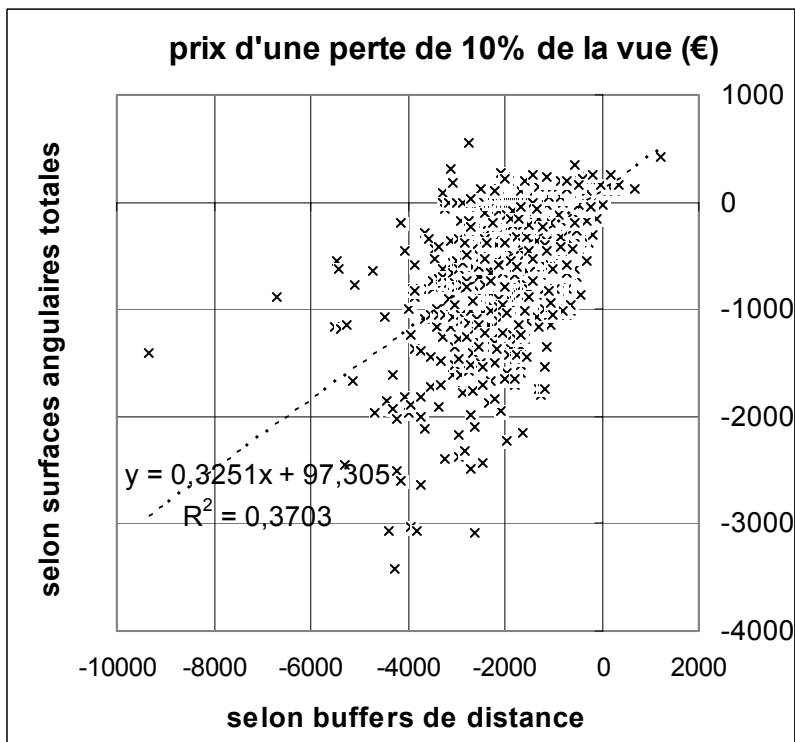
Tableau 5. Résultats des variables paysagères mesurées par le nombre d'objets vus dans les 280 premiers mètres pondéré par la distance

4. Discussion : comparaison des prix hédonistes obtenus

4.1. Le prix hédoniste d'une réduction de la vue

Le prix d'une perte marginale de paysage due, disons, à une construction neuve fermant 10 % de la vue est calculée en chaque point. Le prix hédoniste estimé pour chaque objet est utilisé pour calculer le prix de cette perte marginale de paysage, égale, ici, à la somme des quantités de chaque objet pondéré par son prix.

Les résultats montrent que les corrélations obtenues pour ces prix hédonistes du paysage, estimés point par point, sont faibles : 0,37, 0,43 et 0,64. La dispersion des variables au niveau des observations individuelles, montrée par les figures 6a et 6b, laissait pressentir ces résultats.



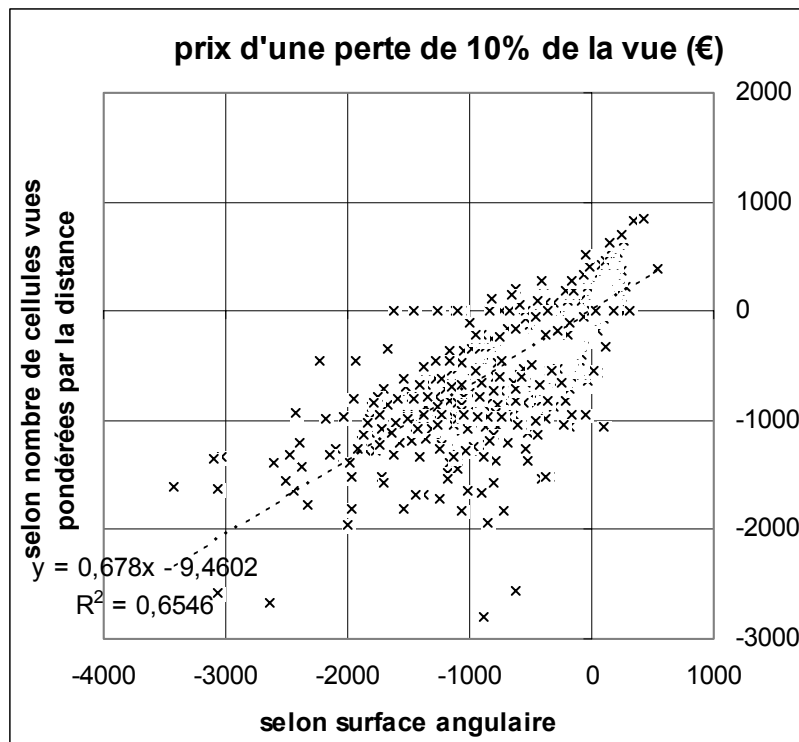


Figure 7. Prix hédoniste de la perte de 10% de la vue selon la métrique paysagère utilisée

Cependant, à un niveau agrégé, celui de l'ensemble des points qui interviennent dans les régressions, les écarts individuels se compensent statistiquement, puisque ce sont les mêmes variables paysagères qui sont significatives. En examinant les R^2 obtenus pour les différentes régressions, on constate que les différences sont minimales. C'est ce que montre le tableau 6.

		couronnes de distance (objets vus et non vus)	surfaces angulaires selon le type d'angle	(distance aux objets) ²	couronnes de distance (vue d'en haut)	surfaces angulaires	distance aux objets	(distance aux objets) ^{0,5}
MCO	R ²	0,7905	0,7896	0,7888	0,7884	0,7886	0,7884	0,7874
	R ² -ajusté	0,7664	0,7651	0,7647	0,7643	0,7643	0,7642	0,7632
2SLS	R ²	0,69667	0,6959	0,69331	0,69568	0,69458	0,69186	0,69067
	R ² -ajusté	0,66175	0,66047	0,6583	0,66093	0,65942	0,65667	0,65535
Mixed	Log vrais.	-640,7	-630,3	-623,9	-621,5	-618,7	-618,2	-608,5
	AIC	-532,7	-518,3	-521,9	-517,5	-512,7	-516,2	-506,5
classement	MCO-R ² ajusté	1	2	3	4	5	6	7
	2SLS-R ² ajusté	1	3	5	2	4	6	7
	mixed-AIC	1	3	2	4	6	5	7
somme des	rangs	3	8	10	10	15	17	21

Tableau 6. Comparaison des résultats statistiques des trois types de métriques et des trois modèles économétriques

Ce tableau compare les résultats des équations avec les mêmes variables non paysagères estimées avec 7 types de variables paysagères différentes : (i) selon les couronnes de distance, avec vue d'en bas, en introduisant dans l'équation les objets vus et non vus, (ii) selon les couronnes de distance, avec vue d'en haut, (iii) selon les surfaces angulaires totales (dues au relief et à la hauteur des objets), (iv) selon les surfaces angulaires en distinguant les angles dus au relief et à la hauteur des objets, selon la distance aux objets vus depuis le sol, (v) sous forme linéaire, (vi) quadratique ou (vii) racine carré. La somme des rangs est faite en dernière ligne.

Les écarts sont faibles (que ce soit pour le R^2 ajusté ou pour l'AIC). La mesure selon les couronnes de distance avec vue (et non vue) depuis le sol arrive toujours au premier rang. Le

deuxième rang est occupé par les surfaces angulaires en distinguant l'origine des angles, par la forme quadratique de la distance aux objets ou par la vue d'en haut. Ces 3 métriques ont un classement de rang global assez proche. Les 3 dernières métriques arrivent nettement après. Le classement le meilleur est donc obtenu pour la métrique selon les couronnes de distance qui introduit les variables paysagères et les objets paysagers présents mais non vus. Cela n'est pas surprenant, car c'est la métrique la plus fine : chaque objet est réparti selon six cercles de distance, chacun d'eux étant susceptible d'expliquer le prix immobilier. Au contraire, avec les surfaces angulaires ou le nombre d'objets pondéré par la surface il n'y a qu'une seule variable par type d'objet, que celui-ci soit situé ou non à une distance pertinente pour les ménages compte tenu de leurs préférences. C'est ainsi qu'on impose que l'agriculture vue à moins de 70 m intervienne dans le calcul, alors qu'avec les cercles de distance il est possible d'isoler l'effet de l'agriculture vue entre 70 et 280 m.

4.2. Le prix hédoniste des objets paysagers

Les métriques utilisées pour mesurer les paysages étant différentes, les résultats obtenus dans les régressions ne sont pas directement comparables. Seule la significativité des paramètres peut être comparée et nous avons vu que ce sont les trois mêmes variables qui sont significativement non nulles au seuil de 5 % : les couverts arborés (vus à moins de 70 mètres lorsqu'on utilise les couronnes de distance), l'agriculture (entre 70 et 280 mètres avec cette même métrique) et les réseaux de communication à moins de 280 mètres de l'observateur dans le cas des couronnes de distance.

Afin de permettre une comparaison plus directe des paramètres estimés, nous analysons l'effet d'une augmentation d'un écart-type de la quantité de ces trois objets paysagers. Le tableau 7 indique l'effet sur le prix d'une maison d'une variation d'un écart-type selon que ces variables sont mesurées par le nombre de cellules par couronnes de distance, par les angles solides ou par le nombre d'objets pondérés par la distance. Pour les réseaux, cette augmentation entraîne une baisse du prix des maisons comprise entre - 0,6 et - 1,5 % selon la métrique paysagère et le modèle économétrique utilisé. Pour l'agriculture, l'augmentation du prix des maisons varie de + 1,7 à + 3,7%. Pour les couverts arborés enfin, l'augmentation d'un écart-type en vue fait augmenter le prix d'une maison de + 1,5 à + 2,3%.

	MCO			2SLS			Mixte		
	couronnes	angles	distance	couronnes	angles	distance	couronnes	angles	distance
foret	2,1%	1,9%	2,3%	2,0%	1,5%	2,2%	1,8%	1,5%	2,3%
agriculture	3,5%	2,9%	2,2%	3,7%	2,0%	2,7%	2,9%	2,3%	1,7%
réseaux	-1,2%	-0,9%	-1,4%	-1,1%	-0,6%	-1,1%	-1,2%	-1,0%	-1,5%

Tableau 7. Effet sur le prix d'une maison d'une variation d'un écart-type des variables paysagères selon la métrique utilisée (couronnes, angles ou distance)

Une comparaison plus synthétique peut être faite en faisant la moyenne des résultats obtenus pour chaque modèle économétrique selon la métrique utilisée. Les résultats sont donnés par le tableau 8.

moyenne	couronnes	angles	distance
foret	2,0%	1,6%	2,3%
agriculture	3,3%	2,4%	2,2%
réseaux	-1,2%	-0,8%	-1,4%

Tableau 8. Moyenne des résultats des estimations par métrique paysagère

Les surfaces angulaires ne donnent jamais la valeur la plus élevée (en valeur absolue), qui se trouve être celle mesurée par le nombre d'objets pondérés par la distance dans deux cas (couverts arborés et réseaux) alors que les cercles de distance donnent la valeur la plus élevée pour l'agriculture.

Il est également intéressant d'examiner les moyennes générales et les coefficients de variation pour toutes les métriques et tous les modèles économétriques. C'est ce qui est fait dans le tableau 9.

	moyenne générale	coefficient de variation
foret	1,9%	15,0%
agriculture	2,6%	23,2%
réseaux	-1,1%	23,7%

Tableau 9. Moyenne des résultats

Les coefficients de variation (écart-type/moyenne) sont de l'ordre de 20 %, ce qui n'est pas très élevé en regard des différences très importantes des métriques paysagères et des modèles économétriques. En effet, les variables paysagères mesurées par les trois types de métrique sont peu corrélées : rappelons que la corrélation n'est que de 0,62 ou 0,34 entre les cellules arborées et agricoles mesurées par les surfaces angulaires et le nombre d'objet pondéré par la distance. Malgré ce lien assez faible, les prix hédonistes obtenus sont assez voisins, autour de 2 % pour un écart-type supplémentaire de surfaces arborées et de 2,1 % pour la même variation d'agriculture vue. On peut penser que la méthode géographique de mesure des paysages a des effets importants sur l'estimation du prix d'un paysage particulier vu depuis une maison particulière, mais que ces différences individuelles s'estompent lorsqu'on raisonne à un niveau agrégé : les écarts individuels dus à la métrique utilisée sont absorbés par le résidu des régressions et l'estimation statistique de l'effet « moyen » dépend peu de la manière de mesurer le paysage.

Conclusion

Dans le domaine de l'évaluation économique des paysages, il est difficile de traduire en variables quantitatives la vue du paysage de façon à pouvoir l'introduire dans les modèles économétriques. Les géographes utilisent une palette qui va de l'analyse de photographies aux modèles de géographie quantitative utilisant des images satellites et des modèles numériques de terrain. Les variables explicatives de la valeur des paysages vont de la psychologie (mystère, ordre, harmonie, etc.) à l'écologie des paysages. Cependant, les travaux sont encore peu nombreux et leurs résultats sont parfois contradictoires. Par exemple un couvert arboré, dont on pourrait penser qu'il a un prix hédoniste positif, peut présenter un signe négatif dans certains travaux. L'agriculture n'est pas, elle non plus, appréciée partout.

L'instabilité, parfois surprenante, des résultats peut provenir des métriques paysagères utilisées dans les évaluations économiques. Par exemple, les travaux qui utilisent la couverture des sols en deux dimensions, saisissent le paysage comme un agencement spatial d'objets physiques ; ce qui conduit à une évaluation approximative, puisque les modalités de perception sont laissées de côté, malgré leur rôle déterminant. Les travaux qui ont recours à la vue modélisée en trois dimensions, mais sans tenir compte des effets de masque dus aux objets hauts, risquent d'aboutir à une surestimation des champs de vision particulièrement sensible sur les premiers plans, surtout quand ceux-ci sont composés d'arbres ou de maisons. Seuls quelques auteurs ont mis en évidence l'intérêt des simulations restituant au mieux la vision sensible des paysages.

Engagée dans ce courant, notre travail s'appuie sur une modélisation de la réalité visuelle du paysage qui permet d'interagir avec l'approche économique. Ainsi, en utilisant plusieurs métriques

relatives aux attributs du paysage, il est possible de tester la robustesse ou la volatilité des résultats d'estimations économétriques. Les métriques retenues mesurent la nature et la quantité d'objets présents dans le paysage et d'objets vus dans la scène paysagère déclinés : (i) selon la profondeur du champ (en distinguant différentes couronnes de distance), (ii) l'emprise visuelle mesurée par les surfaces angulaires des masques verticaux dus au relief et aux objets, et (iii) la surface des objets vus pondérée par leur distance à l'observateur. Ces trois métriques quantifient différemment les objets vus, ce que montre bien la comparaison des résultats individuels. La métrique paysagère a des effets importants sur l'estimation du prix d'un paysage particulier vu depuis une maison particulière. Cependant les prix hédonistes obtenus pour les trois métriques sont assez voisins, autour de 2 % pour un écart-type supplémentaire de surfaces arborées et de 2,1 % pour la même variation d'agriculture vue.

Références

- Anderson S.T., West S.E. (2004), *The value of open space proximity and size: City versus suburbs*, Document de travail, 35 p.
- Arthur L. M., T.C. Daniel and R. S. Boster. (1977). Scenic assessment: an overview. *Landscape planning* 4: 109-129.
- Bastian, C.T., McLeod, D.M., Germino, M.J., Reiners, W.A., Blasko, B.J. (2002), Environmental amenities and agricultural land values: a hedonic model using geographic information systems data, *Ecological Economics*, 40: 337-349.
- Benson E.D., Hansen J.L., Schwartz A.L., Smersch G.T. (1998) – Pricing residential amenities: the value of a view, *Journal of real estate finance and economics*, 16 (1): 55-73.
- Benson J. F., K. E. Scott, C. Anderson, R. Macfarlane, H. Dunsford and K. Turner. (2004), Landscape capacity study for onshore wind energy development in the Western Isles. Scottish Natural Heritage Commissioned Report n°042 (ROAME No. F02LC04).
- Bishop I. D. and D. W. Hulse. (1994), Prediction of scenic beauty using mapped data and geographic information systems. *Landscape urban planning* 30: 59-70.
- Bolitzer, B., Netusil, N.R. (2000), The impact of open spaces on property values in Portland, Oregon, *Journal of Environmental Management*, 59: 185-193.
- Brossard T., Cavailhès J., Hilal M., Joly D., Tourneux F.P., Tritz C., Wavresky P. (2008b), Le marché immobilier, révélateur du prix du paysage, In : Brossard T., Wieber J.C., *Paysage et information géographique*, Ed. Lavoisier - Hermès Science Publication, pp. 207-231.
- Brossard T., Cavailhès J., Hilal M., Joly D., Tourneux F.P., Tritz C., Wavresky P. (2008a), La valeur des paysages périurbains dans un marché immobilier en France, In : Des Rosiers F., Thériault M. *Information géographique et dynamiques urbaines volume 2*, Ed. Lavoisier - Hermès Science Publication, pp. 225-248
- Brossard T., Joly D., Wieber J.C. (1998), Analyse visuelle systématique des paysages de cours d'eau par deux approches complémentaires. *Revue Géographique de Lyon* 73 (4): 299-308.
- Brossard T., Joly D. (1999), Représentation du paysage et échelles spatiales d'information, *Revue internationale de géomatique*, vol. 9, n° 3, p. 359-375.
- Brossard T., Couderchet L., Gaudry M., Joly D. (1997), Impacts paysagers des grands aménagements linéaires et Systèmes d'Information Géographiques. *Conférence Européenne sur les Technologies de l'information pour l'Environnement* 1 : 346-355.
- Brossard T., Wieber J.C. (1980), Essai de formulation systémique d'un mode d'approche du paysage, *Bulletin de l'Association des Géographes Français*, 468-469 : 103-111.
- Brossard T., Wieber J.C. (1984), Le paysage, trois définitions ; un mode d'analyse et de cartographie, *L'Espace Géographique* : 5-12.
- Brunet, R., Ferras, R., Théry H. (1992), *Les mots de la géographie, dictionnaire critique*, Reclus-La Documentation Française, 470 p.
- Burel F., Baudry J., 1999. *Ecologie du paysage, concepts, méthodes et applications*. Ed. TEC & DOC: 359.
- Caruso G. (2002), La diversité des formes de la périurbanisation en Europe, In: Perrier-Cornet, Ph. (ed.), *Repenser les campagnes*. DATAR, Editions de l'Aube, pp. 67-99.

- Cavailhès J. (dir.), Joly D. (dir.), Brossard T., Hilal M., Tourneux F.P., Tritz C., Wavresky P. (2006) - *Les paysages périurbains et leur prix*, Besançon, presses universitaires de Franche-Comté, 192 p.
- Cavailhès J., Brossard T., Hilal M., Joly D., Tourneux F.P., Tritz C., Wavresky P. (2007), Le prix des paysages périurbains, *Economie Rurale* [297-298] 71-84
- Cavailhès J., Brossard T., Hilal M., Joly D., Tourneux F.P., Tritz C., Wavresky P. (2008), Pricing the homebuyer's countryside view, In : Baranzini A., Ramirez J., Schaerer C., Thalmann P. (eds) *Hedonic methods in housing markets*, Springer, pp.83-99
- Cavailhès J., Hilal, M. (1999), Valeurs paysagères périurbaines et localisation résidentielle, *XXXVème colloque de l'ASRDLF, Hyères, 1-3/09/99*, 22 p.
- Chavez P. S. (1991), Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data: Landsat TM and SPOT panchromatic. *Photogrammetric engineering and remote sensing* 57 (3): 295-303.
- Cheshire P. and S. Sheppard. (1995), On the price of land and the value of amenities. *Economica* 62: 247-267.
- Clay G. R. and T. C. Daniel. 2000. Scenic landscape assessment: the effects of land management jurisdiction on public perception of scenic beauty. *Landscape and urban planning*. 49 (1): 1-13.
- Dachary-Bernard, J. (2005) – Une évaluation économique du paysage. Une application de la méthode des choix multi-attributs aux Monts d'Arrée, *Economie et Statistique*.
- Davodeau, H. (2005), Les paysages, une nouvelle préoccupation dans la gestion des espaces périurbains, *Cahiers d'Economie et de Sociologie Rurales*, 77 : 65-84.
- De Floriani L., Marzano P.K., Puppo E. (1994), Line-of-sight communication on terrain models. *International Journal of Geographical Information Systems*, 8 (4): 329-342
- Des Rosiers, F., Thériault, M., Kestens, Y., Villeneuve, P. (2002), Landscaping and house values: an empirical investigation, *Journal of Real Estate Research*, 23: 139-161.
- Dumas, E., Geniaux, G., Napoleone, C. (2005), Les indices de l'écologie du paysage à l'épreuve du marché foncier, *Revue d'Economie Régionale et Urbaine*, 1 : 83-106.
- Foltête J. C. (2004), Mesure de la connectivité du paysage à travers un maillage spatial. *Revue Internationale de Géomatique* 14 (1) : 59-82.
- Forman R. T. T., Gordon M. (1986), *Landscape ecology*. New York: John Wiley and sons.
- Franklin W. R., Vogt C. (2002), *Multiple observer siting on terrain with intervisibility or Lo-Res data*. Ed. Rensselaer polytechnic Institute, 2180-3590. New York: Troy.
- Garrod, G.D., Willis, K.G., Saunders, C.M. (1994), The benefits and costs of the Domerset levels and moors ESA, *Journal of Rural Studies*, 10, 131-146.
- Geoghegan, J., Wainger, L.A., Bockstael, N.E. (1997), Spatial landscape indices in a hedonic framework : an ecological economics analysis using GIS, *Ecological Economics*, 23: 251-264.
- Germino, M.J., Reiners, W.A., Blasko, B.J., McLeod, D., Bastian, C.T. (2001), Estimating visual properties of Rocky Mountain landscapes using GIS, *Landscape and Urban Planning*: 71-83.
- Gobster P.H., Chenoweth R.E. (1989), The dimensions of aesthetics preference: a quantitative analysis, *Journal of Environment Management* 29: 47-72.

- Hobden D.W., G.E. Laughton, K.E. Morgan (2004), Green space borders--a tangible benefit? Evidence from four neighbourhoods in Surrey, British Columbia, 1980--2001, *Land Use Policy* 21: 129-138.
- Howes D. and A. Gatrell. 1993. Visibility analysis in GIS: issues in the environmental impact assessment of windfarm developments. In *EGIS93: proceedings of the fourth European conference on GIS 2*, ed. Harts J. and Ottens H. F. L. Scholten.
- Irwin E.G., Bockstael N.E. (2001) The problem of identifying land use spillovers: measuring the effects of open space on residential property values», *American Journal of Agricultural Economics*, 83 (3), p. 698-704, 2001.
- Irwin, E.G. (2002), The effects of open space on residential property values, *Land Economics*, 78: 465-480.
- Johnston, R.J., Swallow, S.K., Bauer, D.M. (2002), Spatial factors and stated preference values for public goods: considerations for rural land use, *Land Economics*: 481-500.
- Joly D., Brossard T., Tourneux F.P., Tritz C., Cavailhès J., Hilal M., Wavresky P. (2008), Using modeling to make a quantitative valuation of landscape, *Annals of the Association of American Geographers*, à paraître
- Kaplan, R., Austin, M.E. (2004), Out in the country: sprawl and the quest for nature nearby – *Landscape and Urban Planning*, 69: 235-243.
- Kaplan, R., Kaplan, S., Bown, T.(1989) – Environmental preferences. A comparison of four domains of predictors, *Environment and Behavior*, 21: 509-530.
- Kestens Y., M. Thériault and F. des Rosiers. (2004), The impact of surrounding land use and vegetation on single-family house prices. *Environment and Planning B*, 31: 539-567.
- Lacoste Y. 1986. Réflexions d'un géographe sur les paysages réels. In *Lectures du paysage*, ed. Foucher, 14-22, Paris: collection INRAP.
- Lake I. R., A. A. Lovett, I. J. Bateman and B. Day. (2000). Using GIS and large-scale digital data to implement hedonic pricing studies. *International Journal of Geographical Information Science* 14 (6): 521-541.
- Lake, I.R., Lovett, A.A., Bateman, I.J., Langford, I.H. (1998), Modelling environmental influences on property prices in an urban environment, *Computers, Environments and Urban Systems*, 22: 121-136.
- Le Jeannic, T. (1997), Trente ans de périurbanisation : extension et dilution des villes, *Economie et Statistique* 307, 7 : 21-41.
- Lee J. and D. Stucky. (1998), On applying viewshed analysis for determining least-cost paths on Digital Elevation Models. *International Journal of Geographical Information Science*. 12 (8): 891-905.
- Mahan, B.L., Polasky, S., Adams, R.M. (2000), Valuing Urban Wetlands: a Property Price Approach, *Land Economics*, 76: 100-113.
- Meitner M.J., (2004), Scenic beauty of river views in the Grand Canyon: relating perceptual judgments to locations, *Landscape and urban planning*, 68, 1: 3-13.
- Palmer, J.F. (2003), Using spatial metrics to predict scenic perception in a changing landscape: Dennis, Massachusetts, *Landscape and Urban Planning*, 69: 201-218.
- Paterson, R.W., Boyle K.J. (2002), Out of sight, out of mind? Using GIS to incorporate visibility in hedonic property value models, *Land Economics*, 78: 417-425.

- Roe, B., Irwin, E.G., Morrow-Jones, H.A. (2004), The effects of farmland, farmland preservation, and other neighborhood amenities on housing values and residential growth, *Land Economics*: 55-75.
- Rougerie G., Beroutchachvili N. (1991), *Géosystèmes et paysages : bilans et méthodes*, Paris, A. Colin, 302 p.
- Schaerer C., Baranzini A., Ramirez J. V., Thalmann (P.). (2008), Using the hedonic approach to value natural land uses in an urban area : an application to Geneva and Zurich, *Economie publique / Public Economics*, 20 (2007/1) : 147-167.
- Smith, V.K., Poulos, C., Kim, H. (2002), Treating open space as an urban amenity, *Resource and Energy Economics*, 24:107-129.
- Thériault M., Y. Kestens and F. des Rosiers. (2002), The Impact of Mature trees on House Values and on Residential Location Choices in Québec City. In *Integrated Assessment and Decision Support*, ed. A.E. Rizzoli and A.J. Jakeman, 2: 478-483.
- Thorsnes, P. (2002), The value of a suburban forest preserve: Estimates from sales of vacant residential building lots, *Land Economics*, 78: 626-441
- Tyrväinen L. A. and A. Miettinen. (2000), Property prices and urban forest amenities. *Journal of Environmental Economics and Management* 39: 205-223.
- Weicher, J., Zerbst R. (1973) – Externalities of neighbourhood parks: an empirical investigation, *Land Economics*, 49 (1), 99-105.

ANNEXE : VARIABLES PAYSAGERES

Landscape variables:		according to rings: < 70 m, 70-140 m, 140-280 m, 280-1200 m, 280-1200 m, 1.2-6 km, 6-40 km. Cells SEEN and UNSEEN are distinguished. Rings may be merged
ABBREVIATION	DEFINITION	
TREE	number of cells of tree-covered area (R_TREE: rate of these cells)	
TREE * LOT/LSPACE	number of cells of tree-covered area * LOT/LSPACE	
AGRI	number of cells of agriculture (R_AGRI: rate of these cells)	
AGRI * LOT/LSPACE	number of cells of agriculture * LOT/LSPACE	
AGRI * POSUD	number of cells of agriculture * class UD of the zoning scheme	
NETWORK TRANSPORT	number of cells of road/railroad (R_NETWORKS: rate of these cells)	
BUILT	number of built cells (R_BUILT: rate of these cells)	
BUSH	number of cells of bush (R_BUSH: rate of these cells)	
WATER	number of cells of water	
DECID_PACHES	number of patches of deciduous trees within a 70 m radius	
DECID_EDGE	length of deciduous wood edges within a 70 m radius (m)	
AGRI_PACHES	number of patches of crops between 70 - 140 m	
COMPACT	compactness index (0=compact forms; 1=elongate forms), < 70 m	
BUILT ANGULAR SURFACE	angular surface made by built cells (square degrees)	
AGRI ANGULAR SURFACE	angular surface made by cells of agriculture (square degrees)	
TREE ANGULAR SURFACE	angular surface made by tree-covered cells (square degrees)	
BUSH ANGULAR SURFACE	angular surface made by cells of bushes (square degrees)	
NETWORK ANGULAR SURFACE	angular surface made by cells of roads and railroads (square degrees)	
WATER ANGULAR SURFACE	angular surface made by cells of water (square degrees)	