



**HAL**  
open science

# Une méthode d'évaluation géolocalisée de l'insertion des projets routiers dans les territoires et de choix de variantes

Thanh Toan Le

## ► To cite this version:

Thanh Toan Le. Une méthode d'évaluation géolocalisée de l'insertion des projets routiers dans les territoires et de choix de variantes. Autre [cs.OH]. Ecole Centrale de Nantes (ECN), 2011. Français. NNT: . tel-00907595

**HAL Id: tel-00907595**

**<https://theses.hal.science/tel-00907595>**

Submitted on 21 Nov 2013

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

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

Ecole Centrale de Nantes

**ÉCOLE DOCTORALE  
SCIENCES POUR L'INGÉNIEUR, GÉOSCIENCES, ARCHITECTURE**

*Année 2011*

N° B.U. :

**Thèse de DOCTORAT**

Spécialité : GENIE CIVIL

Présentée et soutenue publiquement par :

THANH TOAN LE

le 12 octobre 2011

à l'Institut Français des Sciences et Technologies des Transports,  
de l'Aménagement et des Réseaux (Ifsttar)

**UNE MÉTHODE D'ÉVALUATION GÉOLOCALISÉE DE L'INSERTION DES PROJETS ROUTIERS  
DANS LES TERRITOIRES ET DE CHOIX DE VARIANTES**

**JURY**

Président :	M. Ahmed LOUKILI	Professeur, Ecole Centrale de Nantes
Rapporteurs :	M Youssef DIAB M Jean-Philippe TONNEAU	Professeur des Universités, Université Paris-Est Marne-la-Vallée HDR, UMR Territoires, environnement, télédétection et information spatiale
Examineurs :	Mme Valérie LAFOREST M. Benoît LESAFFRE Mme Agnès JULLIEN M Denis FRANÇOIS	HDR, Maître de recherches, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne Docteur, vice président d'Université Paris-Est Directrice de recherches HDR, Ifsttar Directeur de recherches HDR, Ifsttar
Invité :	M Jean-Marc BUTSTRAEN	Département Infrastructures, société SCE

---

Directeur de thèse : Agnès JULLIEN –HDR

Laboratoire : Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (Ifsttar)

Codirecteur de thèse: Denis FRANÇOIS- HDR

Laboratoire : Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (Ifsttar)

N° ED 498-189



## **REMERCIEMENTS**

*Je remercie chaleureusement Mme Agnès Jullien et M. Denis François de m'avoir accompagné avec leur soutien précieux et avec patience pour mener à bien cette thèse. Grâce à eux, j'ai pu surmonter les difficultés de la langue afin de réussir la rédaction de la thèse. J'ai apprécié et appris beaucoup de leurs méthodes de travail qui seront nécessaires aussi pour ma vie professionnelle.*

*Je remercie très sincèrement M. Youssef Diab et M. Jean-Philippe Tonneau qui ont accepté de rapporter sur ce sujet pluridisciplinaire et appliqué. Grâce à leurs remarques, j'ai pu dégager de nouvelles perspectives à mon travail. Mes remerciements vont également à Mme Valérie Laforest, M. Benoît Lesaffre, M. Ahmed Loukili pour avoir accepté de participer au jury.*

*Je tiens à remercier sincèrement à M. Jean-Marc Butstraen (Département Infrastructure), M. Raynald Lemenn (Directeur Département Environnement), Mme Marie Godard (Directeur Département Développement), qui sont toujours occupés avec leurs projets à l'entreprise mais ils étaient disponibles lorsque j'avais besoin de leurs conseils. Ils m'ont donnés de bonnes conditions de travail avec leurs équipes à l'entreprise. Ici, j'ai reçu l'aide des amis Olivier Kassous, François Marsault, Véronique Rounaud, Chesnot Laurent,...sur le logiciel utilisé pour ma thèse.*

*Un grand merci à l'Association Nationale de la Recherche et de la Technologie (ANRT) pour son aide de financement pour ma thèse.*

*Je ne peux pas oublier les amis de l'équipe EASE (Environnement, Acoustique, Sécurité et Eco-conception) : Fanny Mallard, Amandine Fargier, Adrien Capony, Bogdan Muresan, Michel Dauvergne, Cyrille Belon, Tristan Lorino, Christophe Ropert, Minh-Tan Do, Sylvie Dauvergne, Laurence Lumière, Pierre-Olivier Vandanjon, Judicael Picaut, Benoît Gauvreau, Jean-Marie Prual, Yvan Baudru, ... et les amis de l'ancienne division DDGC (Démarches Durables en Génie Civil) Samir Mokedemm, Jean-François Camenen, Jean-Baptiste Gobert, Yannick Descantes, Laurédan Le Guen, Annick L'Alloret, Frantz Buisson, Florian Huchet, Nicolas Roquet, Frank Tartrou, Henriette Dominiak, Anne Ventura, Olivier Garcin... grâce à eux j'ai eu une bonne ambiance de travail et j'ai appris des connaissances pluridisciplinaires.*

*Enfin, j'adresse mes remerciements les plus profonds à ma famille et mes amis Vietnamiens pour leur soutien pour ma vie en France.*



# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>9</b>
<b>1. PRESENTATION DE L'OBJET D'ETUDE : LA ROUTE.....</b>	<b>10</b>
<b>2. ELEMENTS SUR LE DEVELOPPEMENT DURABLE SELON DIFFERENTS POINTS DE VUE.....</b>	<b>10</b>
<b>2.1. Politique.....</b>	<b>10</b>
<b>2.2. Technique.....</b>	<b>11</b>
<b>3. ELEMENTS SUR LE DEROULEMENT D'UN PROJET ROUTIER.....</b>	<b>12</b>
<b>3.1. Etude de liaison nouvelle à inscrire au schéma directeur routier national.....</b>	<b>12</b>
<b>3.2. Etude préliminaire.....</b>	<b>13</b>
<b>3.3. Etudes d'avant-projet sommaire (APS).....</b>	<b>13</b>
<b>3.4. Etude de projet.....</b>	<b>13</b>
<b>3.5. Projet en phase de réalisation.....</b>	<b>14</b>
<b>3.6. Projet en phase d'exploitation.....</b>	<b>16</b>
<b>4. ACTEURS DANS LE DEBAT PUBLIC ET DANS LA CONCERTATION.....</b>	<b>17</b>
<b>5. OBJECTIFS DE LA THESE.....</b>	<b>18</b>
<b>CHAPITRE 1. PRESENTATION DU CONTEXTE INDUSTRIEL ET DE LA DEMARCHE DE THESE.....</b>	<b>21</b>
<b>1. INTRODUCTION.....</b>	<b>22</b>
<b>2. ANALYSE DES PRATIQUES METIERS.....</b>	<b>22</b>
<b>2.1. Le métier de bureau d'étude en aménagement des projets routiers.....</b>	<b>22</b>
<i>2.1.1. Rôle du bureau d'étude en aménagement.....</i>	<i>22</i>
<i>2.1.2. Moyens mis en œuvre par le bureau d'étude.....</i>	<i>23</i>
2.1.2.1. Compétences techniques.....	23
2.1.2.2. Logiciels couramment utilisés.....	24
<i>2.1.3. Contribution du bureau d'étude à l'avancement des projets.....</i>	<i>25</i>
2.1.3.1. Contribution à la procédure d'intrusion du projet.....	25
2.1.3.2. Méthode de réalisation des cartes par le bureau d'étude avec le logiciel ArcGIS...	29
2.1.3.3. Supports cartographiques d'identification des variantes du projet.....	29
2.1.3.4. Supports de comparaison des variantes.....	31
2.1.3.5. Relations du bureau d'étude avec les acteurs du projet routier.....	32
<b>2.2. Les acteurs du projet routier.....</b>	<b>34</b>
2.2.1. Maître d'ouvrage.....	34
2.2.2. Maître d'œuvre.....	34

2.2.3. <i>Entrepreneur</i> .....	35
2.2.4. <i>Fournisseurs</i> .....	36
2.2.5. <i>Acteurs administratifs</i> .....	36
2.2.6. <i>Public</i> .....	36
2.2.7. <i>Utilisateurs de l'infrastructure</i> .....	37
<b>3. ANALYSE DES BESOIN</b> .....	<b>37</b>
<b>3.1. Besoins du bureau d'étude</b> .....	<b>37</b>
<b>3.2. Besoin de méthodes</b> .....	<b>40</b>
<b>3.3. Bilan des méthodes d'évaluation disponibles</b> .....	<b>40</b>
3.3.1. <i>Grille RST02 (France)</i> .....	40
3.3.2. <i>Méthode de NISTRA (Suisse)</i> .....	40
3.3.3. <i>TransCAD (France)</i> .....	42
3.3.4. <i>Analyse des Multicritères et méthode AHP (Analytic Hierachy Process)</i> ....	42.
3.3.5. <i>Méthode d'évaluation utilisant ArcGIS</i> .....	43
<b>4. DEMARCHE D'UTILISATION D'UN SIG POUR DEVELOPPER UN OUTIL GRAPHIQUE D'EVALUATION DE L'INSERTION DES PROJETS</b> .....	<b>44</b>
<b>4.1. Le choix d'ArcGIS pour effectuer l'évaluation dans la thèse</b> .....	<b>44</b>
<b>4.2. Spécifications retenues pour l'outil</b> .....	<b>48</b>
4.2.1. <i>Réalisation des cartes thématiques et sensibilité</i> .....	48
4.2.2. <i>Recherche des fuseaux de sensibilité</i> .....	48
4.2.3. <i>Insertion des tracés dans les fuseaux déterminés</i> .....	48
4.2.4. <i>Evaluation brute des impacts des tracés</i> .....	49
4.2.5. <i>Evaluation des impacts après des mesures compensatoires</i> .....	49
4.2.6. <i>Comparaison finale des variantes</i> .....	49
<b>5. DESCRIPTION DES CAS D'ETUDE ET DES VARIANTES UTILISEES DANS LA THESE</b> .....	<b>49</b>
<b>5.1. Projet N°1</b> .....	<b>50</b>
<b>5.2. Projet N°2</b> .....	<b>52</b>
<b>5.3. Projet N°3</b> .....	<b>53</b>
<b>5.4. Projet N°4</b> .....	<b>54</b>
<b>6. CONCLUSION</b> .....	<b>54</b>
<b>CHAPITRE 2. CALCUL DES CARTES DE SENSIBILITE ET RECHERCHE DES VARIANTES DE ROUTE</b> .....	<b>55</b>
<b>1. INTRODUCTION</b> .....	<b>56</b>
<b>2. METHODE DE MODELISATION DES CARTES DE SENSIBILITE</b> .....	<b>56</b>

2.1. Carte thématique – Principe de conversion de vecteurs en rasters selon le maillage choisi.....	57
2.2. Attribution des valeurs de sensibilité chiffrée à chaque enjeu.....	59
2.3. Superposition des enjeux dans une thématique.....	62
2.4. Pondération des cartes thématiques et superposition des carte.....	63
2.5. Recherche des variantes de moindre sensibilité sur la carte de sensibilité.....	63
2.6. Test de sensibilité des paramètres du modèle du territoire.....	63
<b>3. VALIDATION DE LA METHODE D’EVALUATION DE LA SENSIBILITE DU TERRITOIRE.....</b>	<b>64</b>
3.1. Réalisation de la carte de sensibilité par addition des cartes thématiques et remplacement des niveaux de couleur par des valeurs de sensibilité.....	64
3.1.1. Application au projet N°1.....	64
3.1.2. Application au projet N°2.....	66
3.2. Réalisation de la carte de sensibilité par la conversion des cartes de sensibilité thématique dans l’intervalle [0 ; 1].....	67
3.3. Analyse de l’effet des tailles de mailles.....	69
3.3.1. Choix de la taille de maille selon la largeur de chaussée.....	69
3.3.2. Résultats projet N°1 : maille de 100 m.....	69
3.3.3. Résultats projet N°1 : maille de 50 m.....	70
3.3.4. Résultats projet N°1 : maille de 25 m.....	70
3.4. Analyse de la pondération des cartes thématiques (maille de 100 m).....	71
3.5. Synthèse.....	72
<b>4. ETUDE DES VARIANTES DE MOINDRE SENSIBILITE – EFFETS DE DIFFERENTES TAILLES DE MAILLES.....</b>	<b>74</b>
4.1. Définition des points d’origine A et d’arrivée B à relier.....	74
4.2. Variante pour la carte de sensibilité dont la maille vaut 100 m.....	75
4.2.1. Recherche de la variante A1_B1.....	75
4.2.2. Recherche de la variante A2_B2.....	75
4.3. Variante pour la carte de sensibilité dont la maille vaut 50 m.....	76
4.3.1. Recherche de la variante A1_B1.....	76
4.3.2. Recherche de la variante A2_B2.....	77
4.4. Variante pour la carte de sensibilité dont la maille vaut 25 m.....	77
4.4.1. Recherche de la variante A1_B1.....	77
4.4.2. Recherche de la variante A2_B2.....	78
4.5. Synthèse sur l’influence du maillage sur l’obtention des variantes.....	78
4.6. Influence de la pondération des thématiques sur l’obtention des variantes pour une maille de 100 m.....	80
4.6.1. Recherche de la variante A1_B1 avec pondération.....	80

4.6.2. Recherche de la variante A2_B2 avec pondération.....	81
<b>4.7. Comparaison des tracés obtenus par ArcGIS à ceux obtenus par le bureau d'étude.....</b>	<b>81</b>
4.7.1. Constatations des différences.....	81
4.7.2. Etude dans le cas de points de passage obligés.....	81
4.7.2.1. Pour la variante qui lie 2 points A1, B1.....	82
4.7.2.2. Pour la variante qui lie 2 points A2, B2.....	83
4.7.2.3. Pour la variante qui lie 2 points A3, B3.....	84
<b>5. CONCLUSION.....</b>	<b>85</b>
<b>CHAPITRE 3. INDICATEURS D'EFFETS GLOBAUX ET LOCAUX DE L'INSERTION DE L'INFRASTRUCTURE ROUTIERE.....</b>	<b>87</b>
<b>1. INTRODUCTION.....</b>	<b>88</b>
<b>2. PRINCIPE DE LA DEMARCHE.....</b>	<b>88</b>
<b>3. INDICATEURS DEVELOPPES.....</b>	<b>90</b>
<b>3.1. Indicateurs scalaires.....</b>	<b>90</b>
3.1.1. Impacts globaux environnementaux.....	90
3.1.1.1. Définition des catégories d'impact.....	90
3.1.1.2. Expression des indicateurs ACV.....	90
3.1.1.3. Formulation et méthode de calcul retenue avec le logiciel ECORCE 1.1.....	94
3.1.1.4. Discussion.....	98
3.1.2. Effet sur les écosystèmes-Fragmentation des écosystèmes.....	98
3.1.2.1. Définition de la fragmentation.....	98
3.1.2.2. Expression des indicateurs pour la fragmentation des écosystèmes.....	98
3.1.2.3. Pertinence de l'indicateur « fragmentation des écosystèmes » en phase de l'étude d'avant projet sommaire.....	99
3.1.2.4. Formulation et méthode de calcul retenue pour les écosystèmes.....	99
3.1.2.5. Aire viable de l'écosystème.....	99
3.1.2.6. Isolement des écosystèmes.....	103
3.1.2.7. Perturbation des écosystèmes.....	104
3.1.2.8. Calcul de l'impact total de la fragmentation des écosystèmes.....	106
<b>3.2. Indicateurs ponctuels.....</b>	<b>107</b>
3.2.1. Effets sur la sécurité et circulation-crétion d'intersections.....	107
3.2.1.1. Définition.....	107
3.2.1.2. Expression d'indicateur « nombre de carrefours ».....	107
3.2.1.3. Pertinence de cet indicateur en phase de l'étude d'avant projet sommaire.....	107
3.2.1.4. Formulation et méthode de calcul retenue.....	107
<b>3.3. Indicateurs segments/ linéiques.....</b>	<b>109</b>
3.3.1. Effets sur le patrimoine bâti, sur le milieu naturel et les espaces disponibles..	109
3.3.1.1. Définition.....	109
3.3.1.2. Expression de l'indicateur « longueur de coupure » .....	109
3.3.1.3. Pertinence de cet indicateur en phase de l'étude d'avant projet sommaire.....	110

3.3.1.4. Formulation et méthode de calcul retenue.....	110
3.3.2. <i>Nuisance sonore-longueur de façade impactée-habitant exposés</i> .....	111
3.3.2.1. Définition de la nuisance sonore.....	111
3.3.2.2. Expression des indicateurs « nuisance sonore » de la littérature.....	112
3.3.2.3. Pertinence de l'indicateur « longueurs de façades exposées aux nuisances sonores »	
3.3.2.4. Formulation et méthode de calcul retenue.....	113
3.3.3. <i>Facilité de cheminement</i> .....	121
3.3.3.1. Définition.....	121
3.3.3.2. Utilité.....	121
3.3.3.3. Pertinence de calcul.....	121
3.3.3.4. Formule de calcul.....	122
3.3.3.5. Calcul à l'aide d'ArcGIS.....	123
3.3.4. <i>Effet sur la vision du territoire</i> .....	126
3.3.4.1. Définition de la vision du territoire.....	126
3.3.4.2. Expression de l'indicateur dans la littérature.....	126
3.3.4.3. Pertinence de l'indicateur « vision » en phase de l'étude d'avant projet	
sommaire.....	126
3.3.4.4. Formulation et méthode de calcul retenue.....	127
<b>3.4. Indicateurs surfaciques.....</b>	<b>129</b>
3.4.1. <i>Réduction des surfaces disponibles-Prélèvement d'emprise</i> .....	129
3.4.1.1. Définition du problème d'emprise.....	129
3.4.1.2. Pertinence de cet indicateur en phase d'étude d'avant projet sommaire.....	129
3.4.1.3. Expression des indicateurs « surfaciques » .....	129
3.4.1.4. Formulation et méthode de calcul retenue.....	130
3.4.2. <i>Rayonnement</i> .....	132
3.4.2.1. Définition .....	132
3.4.2.2. Utilité.....	132
3.4.2.3. Formule de calcul.....	132
3.4.2.4. Expression de l'indicateur.....	132
3.4.2.5. Calcul à l'aide d'ArcGIS.....	134
<b>4. SYNTHESE DES INDICATEURS PROPOSES.....</b>	<b>136</b>
<b>5. CONCLUSION.....</b>	<b>138</b>
<b>CHAPITRE 4. APPLICATION DE LA DEMARCHE A UN CHOIX DE VARIANTE DE</b>	
<b>L'INFRASTRUCTURE.....</b>	<b>139</b>
<b>1. INTRODUCTION.....</b>	<b>140</b>
<b>2. DESCRIPTION GEOMETRIQUE DES VARIANTES.....</b>	<b>140</b>
<b>3. COMPARAISON DES VARIANTES PAR INDICATEURS ET CLASSEMENT PAR INDICATEUR.....</b>	<b>141</b>
<b>3.1. Impacts globaux environnementaux.....</b>	<b>141</b>
3.1.1. <i>Données et hypothèse de calcul</i> .....	141
3.1.2. <i>Résultats obtenus</i> .....	143
3.1.3. <i>Comparaison des variantes selon les impacts globaux environnementaux</i> .....	147

3.1.4. Discussion – Indicateurs entrants et sortants.....	149
<b>3.2. Effets sur les écosystèmes – Fragmentation des écosystèmes.....</b>	<b>149</b>
3.2.1. Données et hypothèse de calcul.....	149
3.2.2. Résultats obtenus .....	150
3.2.2.1. Aire de l'écosystème (Indicateur $I_{\text{aire}}$ ) .....	150
3.2.2.2. Isolement des écosystèmes (Indicateur $I_{\text{iso}}$ ) .....	153
3.2.2.3. Perturbation des écosystèmes (Indicateur $I_{\text{per}}$ ) .....	155
3.2.3. Comparaison des variantes selon l'indicateur $I_F$ .....	159
<b>3.3. Effets sur la sécurité et circulation – création des intersections.....</b>	<b>159</b>
3.3.1. Données de calcul .....	159
3.3.2. Résultat obtenu .....	159
3.3.3. Comparaison des variantes selon l'indicateur $N_C$ .....	160
<b>3.4. Effets sur le patrimoine bâti sur le milieu naturel et les espaces disponibles.....</b>	<b>160</b>
3.4.1. Données de calcul .....	160
3.4.2. Résultat obtenu .....	161
3.4.3. Comparaison des variantes selon l'indicateur $L_C$ .....	162
<b>3.5. Nuisance sonore.....</b>	<b>163</b>
3.5.1. Données de calcul.....	163
3.5.2. Résultat obtenu .....	163
3.5.3. Comparaison des variantes selon l'indicateur « nuisance sonore » .....	166
<b>3.6. Facilité de cheminement.....</b>	<b>167</b>
3.6.1. Données de calcul.....	167
3.6.2. Résultat .....	167
3.6.2.1. Etat initial de l'aire d'étude.....	167
3.6.2.2. Cheminement optimum grâce aux variante 1 et 2 .....	168
3.6.2.3. Cheminement optimum grâce à la variante 3.....	169
3.6.2.4. Cheminement optimum grâce à la variante 4.....	169
3.6.2.5. Cheminement optimum grâce à la variante 5.....	170
3.6.3. Comparaison des variantes selon l'indicateur $I_p$ .....	170
3.6.3.1. Cheminement du point A au point B.....	170
3.6.3.2. Cheminement du point A au point C.....	171
<b>3.7. Prélèvement d'emprise.....</b>	<b>173</b>
3.7.1. Données et hypothèse de calcul .....	173
3.7.2. Résultat obtenu.....	173
3.7.3. Comparaison des variantes selon l'indicateur longueur de coupure équivalente..	
<b>3.8. Rayonnement.....</b>	<b>174</b>
3.8.1. Données et hypothèse de calcul .....	174
3.8.2. Résultats .....	174
3.8.2.1. Etat initial.....	174
3.8.2.2. Insertion de la variante 1.....	175
3.8.2.3. Insertion de la variante 2.....	175
3.8.2.4. Insertion de la variante 3.....	176

3.8.2.5. Insertion de la variante 4.....	177
3.8.2.6. Insertion de la variante 5.....	178
3.8.3. <i>Comparaison des variantes selon l'indicateur <math>S_r</math></i> .....	179
<b>4. COMPARAISON D'ENSEMBLE DES VARIANTES.....</b>	<b>180</b>
<b>4.1. Première méthode : classement simple.....</b>	<b>180</b>
<b>4.2. Deuxième méthode : comparaison des variantes en faisant la somme des classements.....</b>	<b>181</b>
<b>4.3. Troisième méthode : conversion des indicateurs en valeurs sans unité.....</b>	<b>181</b>
4.3.1. <i>Principe de la méthode</i> .....	181
4.3.2. <i>Application de la méthode</i> .....	183
4.3.2.1. Résultats des indicateurs adimensionnés.....	183
4.3.2.2. Pondération des indicateurs et classement des variantes.....	183
4.3.2.3. Sensibilité des variantes aux combinaisons et pondération des indicateurs, classement des variantes.....	184
<b>5. CONCLUSION.....</b>	<b>185</b>
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>187</b>
<b>REFERENCES.....</b>	<b>191</b>
<b>ANNEXE.....</b>	<b>197</b>
<b>RESUME.....</b>	<b>217</b>



## **INTRODUCTION GENERALE**

## **1 PRÉSENTATION DE L'OBJET D'ÉTUDE : LA ROUTE**

La construction des routes joue un rôle important dans le développement économique d'un pays, mais dans le contexte actuel, la réalisation d'une route doit intégrer les critères du développement durable. Ainsi le projet doit satisfaire les demandes sur le coût de construction et d'entretien mais aussi nuire le moins possible à l'environnement global et local. Enfin, il doit répondre à des demandes sociales des acteurs (sécurité, accessibilité, rapidité de déplacement...). L'évaluation des projets routiers selon ces critères est indispensable, dans les pays développés comme dans ceux en développement, mais elle constitue un problème complexe.

L'évaluation d'un projet routier (route nationale, autoroute) se compose des étapes suivantes :

- Etude de liaison nouvelle à inscrire au schéma directeur routier national ;
- Etude préliminaire ;
- Etude d'avant-projet sommaire ;
- Etude de projet ;
- Projet en phase de réalisation ;
- Projet en phase d'exploitation.

Pour les projets routiers départementaux ou des routes dont l'aire d'étude est réduite (quelques km), les maîtres d'ouvrages ignorent fréquemment l'étape de l'étude préliminaire. Les décisions finales relatives au projet routier découlent d'une concertation et d'un débat public.

## **2 ÉLÉMENTS SUR LE DÉVELOPPEMENT DURABLE SELON DIFFÉRENTS POINTS DE VUE**

### **2.1 Politique**

Selon le rapport Brundtland (1987), le développement durable est un processus de développement qui répond aux besoins sociaux, environnementaux et économiques du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre à leurs besoins.

Les trois dimensions du développement durable doivent être considérées et leur équilibre doit être recherché en fonction de l'état initial de développement de chaque pays (développé, émergent, ou en voie de développement).

Un transport durable (AIPCR, 1999) s'entend pour un système qui permet aux particuliers et aux sociétés de satisfaire leurs principaux besoins d'accès d'une manière pratique et compatible avec la santé des êtres humains et des écosystèmes. Il doit offrir un choix de modes de transports et servir d'appui à une économie dynamique. Il doit limiter les émissions et les déchets de manière à ce que ceux-ci ne dépassent pas la capacité de la planète à les absorber. Il doit réduire au minimum la consommation de ressources non renouvelables, réutiliser et recycler ses composantes et réduire au minimum le bruit et l'utilisation des terrains.

Par exemple en Suisse, la politique publique des transports utilise les principes du développement durable (DETECT, 2000). Les objectifs sur les trois plans en sont les suivants.

1. Sur le plan économique, il est question « d'efficacité ». L'efficacité économique en la matière vise à :

- créer une infrastructure performante ;
- améliorer l'efficacité de l'investissement et assurer un bon prix de construction de l'infrastructure ;
- prendre en compte les coûts externes (contribution au réchauffement climatique, accidents sur chantiers; pollution de l'air, nuisance sonore dans le travail...);
- utiliser de manière optimale les possibilités offertes par les infrastructures pré-existantes ;
- favoriser la compétitivité des entreprises de transport.

2. Sur le plan social, il est question de « justice ». La justice sociale en la matière vise à :

- garantir un approvisionnement de base sur l'ensemble du territoire ;
- prendre en compte les personnes qui n'ont pas facilement accès aux infrastructures de transport (il faut par exemple offrir aux habitants qui n'ont pas de voitures personnelles un système de transport en commun) ;
- assurer le bien-être des personnes et réduire au minimum les risques pour la santé ainsi que les accidents.

3. Sur le plan environnemental, il est question de « viabilité ». La viabilité écologique en la matière vise à :

- réduire à long terme les atteintes à l'environnement imputables aux transports (polluants atmosphériques, nuisances sonores, occupation des sols, dégradation du paysage et du cadre de vie) ;
- réduire la consommation d'énergie, en particulier des ressources non renouvelables (pétrole, bitume, électricité...).

## 2.2 Technique

D'après Tille (2000), sur le plan économique, le développement est durable lorsque :

- le rendement économique et la richesse de la société peuvent être sauvegardés à long terme ;
- l'économie est compétitive, elle permet la création d'emplois et l'amélioration du bien-être général ;
- les prix prennent en compte l'exploitation excessive des ressources, des facteurs de production de biens et de services.

Sur le plan social, le développement est durable lorsque :

- les droits de l'homme sont respectés et les droits démocratiques garantis ;
- l'espérance de vie est prolongée dans les pays pauvres ;
- l'épanouissement culturel est assuré ;

- la protection sociale est garantie et la répartition équitable des revenus et des richesses ainsi que l'égalité entre l'homme et la femme sont encouragées ;
- la santé des individus est non seulement protégée mais encore améliorée.

Enfin, sur le plan environnemental, le développement est durable lorsqu'il permet :

- d'assurer le développement des êtres humains et des écosystèmes en terme de quantité, de qualité, de diversité... ;
- de maintenir l'utilisation des ressources renouvelables ;
- de stabiliser ou réduire la consommation des ressources non-renouvelables. Les ressources sont non-renouvelables si leur taux de régénération est supérieur ou égal au taux d'exploitation, par la chasse ou la pêche (les ressources vivantes naturelles : gibier, poisson sauvage, humus, forêt primaire... ) ;
- de maintenir à long terme les diverses émissions polluantes à un niveau minimum ;
- de réduire le risque et les effets des catastrophes écologiques (marée noire, élargissement du trou dans la couche d'ozone... ) .

### **3 ÉLÉMENTS SUR LE DÉROULEMENT D'UN PROJET ROUTIER**

Différentes étapes sont suivies lors de la démarche du bureau d'études qui est modélisée dans la thèse. Ces étapes de déroulement d'un projet routier sont rappelées ci-après et sont issues de circulaires définissant les modalités d'un projet routier (METT, 1994).

#### **3.1 Etude de liaison nouvelle à inscrire au schéma directeur routier national**

C'est la première étape pour l'étude d'un projet routier qui présente globalement la situation et l'objectif du projet. Elle se compose des études suivantes :

- Etude de faisabilité de l'aménagement et étude du trafic : ces études comportent notamment une analyse des trafics et une évaluation socio-économique et environnementale permettant de recenser les besoins en déplacement et d'identifier les objectifs auxquels une nouvelle infrastructure devrait répondre ;
- Débat sur l'intérêt économique et social du projet .

#### **3.2 Etude préliminaire**

Cette étape a pour objectif de définir les fonctions de la route et les moyens de réalisation :

- choix de la zone d'étude (bande de territoire de 10 à 20 km de large), choix de la classe de la route ;
- choix et justification des modes de transport (route, tramway ou ferroviaire ) ;
- choix du type de route à réaliser ;
- première estimation des impacts sur l'environnement et sur l'aménagement du territoire ;

- définition des séquences prioritaires d'aménagement à 15 ans ;
- repérage des ouvrages d'art non courants importants nécessaires et des ouvrages dont la Direction des routes doit tenir compte pour le tracé de la route ;
- détermination des besoins de protection de zones foncières menacées à court terme.

Les principales tâches à réaliser pour cette étape sont (SETRA, 1999) :

- le recueil des données techniques, économiques et environnementales de la zone d'étude ;
- la définition et la comparaison de variantes de fuseau de passage (1000 m de large) ;
- la consultation des administrations et des élus locaux ;
- le choix d'un fuseau par décision ministérielle ou par la décision du conseil général.

Dans le cas d'une étude préliminaire d'APS, l'approbation intervient sur la base d'un dossier comprenant :

- le dossier d'étude préliminaire ;
- le dossier de synthèse préparé par le maître d'ouvrage sur la base des avis du DRE (Direction régionale de l'Équipement) pour les SMO (services régionaux de maîtrise d'ouvrage).

Cette étape est obligatoire pour un projet d'autoroute et de route nationale. Pour un projet de route départementale dont l'aire d'étude est réduite, on peut passer cette étape pour chercher directement des variantes de route.

### **3.3 Etude d'avant-projet sommaire (APS)**

Les principales tâches nécessaires à cette étape sont (SETRA, 1999) :

- le recueil des données techniques, économiques et environnementales sur le fuseau de 1000 m choisi;
- la recherche et la comparaison de variantes de tracés (bande de 300 m de large) et d'échangeurs dans le fuseau ;
- la consultation des administrations et des élus locaux ;
- la définition précise des fonctions locales de l'aménagement envisagé ;
- la définition des opérations à réaliser à l'échéance de 15 ans ;
- la confirmation des séquences prioritaires d'aménagement ;
- le choix du tracé parmi les variantes (bandes de 300 m) ;
- l'étude plus précise de la bande choisie ;
- l'approbation ministérielle du dossier d'APS ;
- l'estimation du coût.

### **3.4 Etude de projet**

Les principales tâches de cette étape sont (SETRA, 1999) :

- la définition précise des caractéristiques géométriques de l'emprise, des échangeurs, des rétablissements de voiries ;
- les études géotechniques pour vérifier des paramètres du sol dans le calcul de terrassement, de la chaussée et des OA ;
- les études des OA ;
- les études d'environnement, qui visent les impacts et les mesures compensatoires, c.-à-d. les mesures destinées à réduire ces impacts (écosystème, bruit, pollution d'air...) ;
- les éléments techniques nécessaires à l'enquête (par exemple l'utilisation de formulaires pour connaître les avis des habitants sur l'impact du bruit, ainsi que l'utilisation d'équipements pour mesurer la nuisance sonore. A partir de là, des solutions de réduction des nuisances sonores sont proposées) ;
- l'estimation détaillée du coût du projet ;
- le planning prévisionnel de réalisation du projet ;
- le passage de conventions avec les collectivités territoriales qui cofinancent l'investissement et l'entretien.

### **3.5 Projet en phase de réalisation**

La réalisation du projet routier comporte deux phases : la préparation de la construction de la route et l'exécution des travaux.

- Pour la préparation de la construction de la route : les devis du projet sont établis : appel d'offres et dossier de consultation des entreprises, remise des offres, choix des entreprises, signature du marché. Les agents chargés des acquisitions foncières négocient avec les propriétaires fonciers l'achat des terrains nécessaires à la route. L'acquisition des terrains est faite par l'Etat ou les collectivités territoriales (ASCOTP, 2011).
- L'exécution des travaux comporte deux phases : celle relative aux travaux de terrassement, puis celle relative à la construction des couches de chaussées. Avant la mise en service de l'ouvrage routier, cette seconde phase comporte la mise en place des équipements de la route (équipement de sécurité, signalisation verticale et horizontale...). Une structure typique d'une route est présentée en Figure 0.1

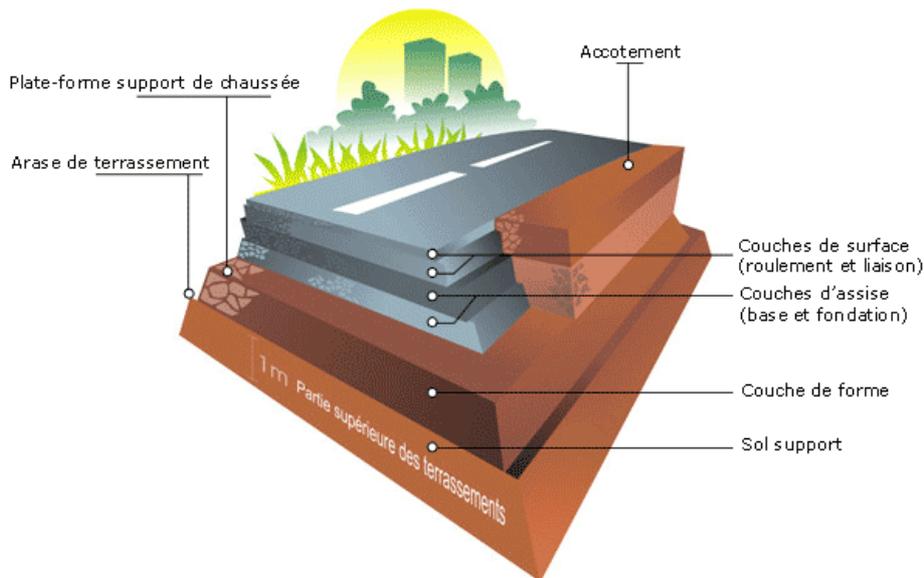


Figure 0.1 Une structure de route typique (source : UNICEM, 2008).

Les travaux de terrassement (déblaiement, remblaiement) servent d'une part à adapter la topographie locale au profil en long et en travers du projet routier, et d'autre part à réaliser des couches (couche de remblai et couche de forme) permettant de supporter la structure de chaussée. Le terrassement dépend donc du relief, des caractéristiques géologiques et géotechniques des sols rencontrés et de la géométrie de l'ouvrage. La limite supérieure des travaux de terrassement est la plate-forme support de chaussée (Figure 0.1) à partir de laquelle les entreprises routières prennent le relai des entreprises de terrassement.

Dans la nature, les matériaux sont généralement hétérogènes et s'avèrent souvent évolutifs dans l'espace et dans le temps. Dans la pratique des travaux de terrassement, on distingue trois natures de terrain (meuble, rocheux et mixte) pour lesquels les techniques d'excavation sont très différentes (Devaux et Rachline, 2004). Les terrains meubles (de faible cohésion ou sans cohésion) sont constitués de limons, sables, argiles, alluvions, moraines. Les terrains rocheux (dont la cohésion est forte) sont constitués de roches saines (granit, calcaire, gneiss...) ou de sols compacts (argilites et marnes).

Les conditions climatiques constituent un paramètre important à prendre en compte dans les travaux de terrassement car elles jouent sur l'ouvrabilité des matériaux à travers leur teneur en eau en particulier.

### Construction de la chaussée

Les couches de chaussées se composent d'une part de la couche de forme, des couches d'assise (couche de fondation, surmontée de la couche de base) et d'autre part des couches de surface (couche de liaison, surmontée de la couche de roulement).

La couche de forme sert en particulier à homogénéiser la portance du sol support pour réaliser des couches de chaussée d'épaisseur constante, et doit maintenir ses performances malgré les fluctuations de l'état hydrique du sol support. Elle sert aussi à la protection thermique des sols supports gélifs et contribue au drainage de l'ouvrage routier. Pendant la phase de travaux, elle protège le sol support, elle établit une qualité de nivellement et permet la circulation des engins pour l'approvisionnement des matériaux et la construction des couches de chaussée. Vis-à-vis du fonctionnement mécanique de la chaussée, elle permet de

rendre plus homogène et éventuellement d'améliorer les caractéristiques dispersées des matériaux de remblai ou du terrain en place ainsi que de les protéger du gel.

Les couches d'assise servent à créer un support uniforme, à empêcher l'humidité de s'infiltrer, tant de la surface vers la plate-forme, que de bas en haut (remonté capillaire à partir des sols supports humides) (Do et al., 1998). Ces couches en matériaux élaborés apportent à la chaussée la résistance mécanique aux charges verticales induites par le trafic. Elles répartissent les pressions sur la plate-forme support afin de maintenir les déformations à ce niveau dans des limites admissibles (METT, 1994).

Les couches de surface permettent la circulation des véhicules et supportent directement leur impact ainsi que celui des facteurs naturels (pluie, vent, cycles thermiques) (Do et al., 1998). Ces couches sont constituées de matériaux aux caractéristiques mécaniques élevées, en général à base de liants hydrocarbonés et utilisent des granulats de granulométrie faible ayant une bonne résistance au polissage.

### **3.6 Projet en phase d'exploitation**

Le schéma directeur d'exploitation de la route définit trois missions :

- le maintien de la viabilité : surveillance des réseaux, déclenchement d'interventions d'urgence, service d'entretien hivernal, organisation des chantiers d'entretien, maintenance des équipements de la route ;
- la gestion du trafic : surveillance du trafic, répartition des flux de circulation dans le temps et dans l'espace, élaboration de plans de gestion du trafic ;
- l'aide au déplacement : information prévisionnelle et en temps réel sur le trafic et l'état du réseau.

Les outils permettant l'exploitation de la route sont des équipements de recueil de données (trafic, conditions météorologiques), des moyens de transmission et de traitement de l'information, ainsi que des moyens de communication avec les usagers.

Selon (SETRA, 1985, 1994), trois types de routes principales interurbaines sont distinguables :

- les routes de type L ainsi désignées par référence à la notion de grande liaison, sont les « autoroutes » ;
- les routes de type T, pour lesquelles la fonction d'écoulement du trafic de transit à moyenne ou grande distance est privilégiée, sont les « routes express à une chaussée » ;
- les routes de type R, qui constituent l'essentiel des réseaux des voies principales de rase campagne, sont multifonctionnelles ; ce sont les « artères interurbaines » et les « routes ».

## 4 ACTEURS DANS LE DÉBAT PUBLIC ET DANS LA CONCERTATION

L'article L.121-1 du code de l'environnement prévoit que les grandes opérations publiques d'aménagement national de l'État, des collectivités territoriales, des établissements publics et des sociétés d'économie mixte présentant un fort enjeu socio-économique ou ayant un impact significatif sur l'environnement, soient soumises à un débat public qui est organisé sur les objectifs et les caractéristiques principales des projets, pendant la phase de leur élaboration (CERTU, 2006).

Dans le domaine routier, les projets devant faire l'objet d'une saisine de la Commission nationale du débat public (CNDP) sont les projets de création d'autoroutes, de routes express ou de routes à deux fois deux (2x2) voies à chaussées séparées, ainsi que les élargissements de routes existantes à 2 voies ou 3 voies pour en faire des routes à 2x2 voies ou plus à chaussées séparées.

Si le coût du projet est supérieur à 300 millions d'euros ou sa longueur supérieure à 40 km, le maître d'ouvrage saisit obligatoirement la CNDP.

Si le coût est compris entre 150 et 300 millions d'euros ou sa longueur comprise entre 20 et 40 km, le maître d'ouvrage doit rendre son projet public grâce à un avis dans la presse. Dans ce cas, la CNDP peut être saisie par le maître d'ouvrage, par la personne publique responsable du projet, par dix parlementaires, par un conseil régional, par un conseil général, par un conseil municipal, par un établissement public de coopération intercommunale ayant une compétence en matière d'aménagement de l'espace, territorialement intéressés ou enfin par une association agréée de protection de l'environnement exerçant son activité sur l'ensemble du territoire national. Cette saisine doit intervenir dans un délai de 2 mois à compter du moment où ces projets sont rendus publics par le maître d'ouvrage.

Une fois saisie, la CNDP veille à ce que le public puisse participer à l'élaboration du projet. Elle dispose de diverses possibilités pour adapter les modalités de la concertation à la taille et aux enjeux du projet (débat public, concertation, etc.). Elle décide dans un délai de deux mois après la saisine des suites à donner :

- elle peut décider l'organisation d'un débat public et mettre en place une commission particulière du débat public (CPDP) ;
- elle peut décider l'organisation d'un débat public qu'elle confie au maître d'ouvrage ;
- elle peut recommander au maître d'ouvrage une concertation et les modalités de concertation à mettre en œuvre ;
- elle peut rejeter la saisine.

Dans les deux premiers cas, le maître d'ouvrage dispose d'un délai de 6 mois pour établir le dossier du débat public et pour proposer les modalités d'organisation. Le débat se déroule pendant 4 mois. Cette durée peut être allongée de 2 mois en cas de contre-expertise demandée au cours du débat.

Le débat porte sur l'opportunité, les objectifs ou les caractéristiques principales du projet. A son issue, les organisateurs du débat public rédigent un bilan et un compte rendu. Le maître d'ouvrage prend une décision motivée, publiée au Journal officiel, indiquant le principe et les conditions de la poursuite du projet (MEDDTL, 2011).

### Concertation autour des projets routiers

La concertation des personnes concernées par un projet avant sa réalisation consiste à confronter les propositions du maître d'ouvrage à la critique des acteurs intéressés (riverains, habitants, associations...). Le maître d'ouvrage s'engage à écouter les avis et les suggestions des personnes consultées, à éventuellement modifier son projet pour tenir compte de leurs contre-propositions, voire à y renoncer intégralement (CERTU, 2006).

La concertation réunit diverses associations (de riverains, de protection de l'environnement, profession agricole, sports et loisirs...), 15 élus du conseil général, le maître d'œuvre et le maître d'ouvrage.

C'est dans l'étude d'avant projet sommaire que tous les points de vues doivent être entendus afin de concilier au mieux les demandes. Le développement de l'outil doit permettre de favoriser les échanges entre le maître d'ouvrage, le maître d'œuvre et les acteurs de la vie locale (habitants, associations et élus).

## **5 OBJECTIFS DE LA THÈSE**

Ce travail de thèse s'appuie sur des considérations techniques en lien avec les caractéristiques de la route que le projet définit. Les réflexions portent notamment sur la réalisation d'un outil d'évaluation des impacts de l'insertion des projets routiers dans un territoire, utilisable par les différents acteurs et dans le cadre de la concertation. La réalisation d'un tel outil suppose le développement d'une méthode d'évaluation à partir d'un jeu d'indicateur qui relève du développement durable. De plus, les figures et les résultats produits par un tel outil doivent permettre d'alimenter la discussion entre les différents acteurs du projet. Il est donc important que les indicateurs produits soient compréhensibles et les représentations graphiques pédagogiques.

Les différents chapitres de la thèse abordent :

- L'étude des rôles des différents acteurs, des étapes d'un projet routier, les métiers et les besoins du bureau d'étude, les méthodes existantes pour l'évaluation des projets routiers (chapitre 1).
- Le développement d'une méthode de calcul de la carte de sensibilité du territoire et de la recherche des variantes de moindre impact (chapitre 2).
- Le développement de méthodes de calcul graphique par SIG des indicateurs du développement durable appliqués aux projets routiers (chapitre 3).
- La mise en application de cette démarche d'évaluation graphique à des variantes de projet prédéterminées dans un territoire en utilisant l'outil de calcul des indicateurs pour la comparaison de différentes variantes de tracé afin d'en faciliter le classement (chapitre 4).

Ce présent travail, effectué dans le cadre d'un financement CIFRE accordé au bureau d'études SCE s'est déroulé à l'IFSTTAR, centre de Nantes, dans le cadre d'une opération de recherches (EPEES) portant sur l'étude des prévisions et effets des infrastructures de Génie Civil sur l'environnement.





## **CHAPITRE 1**

# **PRÉSENTATION DU CONTEXTE INDUSTRIEL ET DE LA DÉMARCHE DE THÈSE**

## **1 INTRODUCTION**

Ce chapitre présente la démarche de thèse. La thèse a pour but de développer une méthode d'évaluation explicite et quantitative d'évaluation de l'insertion des projets routiers dans un territoire urbain ou interurbain. La méthode qu'on souhaite développer dans la thèse doit permettre de trouver de manière semi-automatisée et sous forme d'une évaluation paramétrable, des solutions à la recherche de variantes de tracés. L'outil qui va résulter de cet objectif doit pouvoir prendre en compte des méthodes préexistantes de calculs d'indicateurs et permettre d'en proposer d'autres. Compte tenu du type d'activité qu'on étudie, une part importante du travail s'appuie sur l'évaluation spatialisée d'effets potentiels sur le territoire des routes.

Les utilisateurs futurs du travail de programmation envisagé au cours de la thèse interviennent aux différents stades de concertation d'un projet routier. Ils sont intégrés à la démarche dès son élaboration afin que l'outil réponde à leurs besoins. On a distingué de fait deux types d'utilisations potentielles du logiciel :

- une utilisation interne dans le bureau d'étude (travail technique du bureau d'étude).
- une utilisation en interactivité avec les clients du bureau d'étude (incluant en particulier une visualisation de résultats d'indicateurs présentés graphiquement).

La démarche développée au cours de la thèse tient donc compte de ces points de vue et utilisations possibles. Ainsi, dans ce chapitre qui présente la démarche de thèse, les éléments étudiés sont les pratiques métier, les méthodes de travail utilisées par le bureau d'études pour définir des variantes de tracé de route dans un territoire. Les parties suivantes sont étudiées :

- la première partie du chapitre 1 présente l'analyse des pratiques métiers des acteurs dans un projet routier en commençant par celui du bureau d'études, central dans ce travail ;
- la deuxième partie du chapitre présente des métiers du bureau d'étude, mobilisés pour les projets routiers (rôle, compétences, contribution) ;
- la troisième partie du chapitre présente différentes études de cas sur lesquelles la thèse est appuyée, à la fois pour proposer une méthode d'évaluation et pour la tester.

## **2 ANALYSE DES PRATIQUES MÉTIERS**

### **2.1 Métier de bureau d'étude en aménagement des projets routiers**

Le développement d'un outil permettant d'évaluer l'insertion d'un projet routier dans le territoire nécessite de connaître les spécificités du métier de bureau d'étude en aménagement, son rôle, ses moyens, ses relations avec les acteurs du projet.

#### **2.1.1 Rôle du bureau d'étude en aménagement**

Le rôle essentiel du bureau d'étude en aménagement est de formaliser et de fournir au maître d'ouvrage les éléments d'aide à la décision pour définir les caractéristiques du projet qui sera réalisé. Cet objectif nécessite la collecte et le traitement de données relatives au territoire qui sera traversé par le projet, la restitution des résultats sous forme interprétable par les acteurs du projet, qu'elles soient de nature qualitatives ou quantitatives, cartographiques ou non. Pour réaliser sa mission, le bureau d'étude doit entrer en contact avec de nombreux

acteurs publics et privés du territoire fournisseurs de données, d'informations, d'avis. Il doit produire lui-même les données éventuellement manquantes à son analyse en conduisant ses propres études (collecte de données de terrain, résultats de calculs, de simulations mathématiques éventuelles). Enfin, le bureau d'étude peut participer à la concertation en appui au maître d'ouvrage ou au maître d'œuvre, en présentant et expliquant les résultats de ses travaux en réunion publique.

Le bureau d'étude est typiquement une entreprise indépendante de la maîtrise d'œuvre.

## **2.1.2 Moyens mis en œuvre par le bureau d'étude**

### **2.1.2.1 Compétences techniques**

Pour réaliser sa mission, le bureau d'étude en aménagement dispose de compétences dans les divers domaines du projet routier et de l'environnement.

Les bureaux d'étude en environnement disposent des compétences :

- d'écologues, travaillant sur la flore, la faune et les composantes des milieux que sont le sol, l'eau et l'air. Ils déterminent la richesse et la vulnérabilité des différents milieux touchés par les variantes des projets ;
- de géologues et hydrogéologues, travaillant sur les caractéristiques pétrographiques des terrains traversés (relation avec les géotechniciens) et sur les interactions éventuelles des eaux souterraines avec les variantes de tracé (risques de perturbation des écoulements, vulnérabilité des eaux de nappes) ;
- d'hydrologues et d'hydrauliciens, travaillant sur les interactions éventuelles des variantes avec l'écoulement des eaux de surface : risques d'inondation ; maintien de conditions d'écoulement (principe de la transparence hydraulique des ouvrages routiers) ;
- de paysagistes et d'architectes, travaillant sur l'intégration esthétique du projet dans l'environnement local ;
- d'urbanistes, travaillant sur l'intégration fonctionnelle et sociale du projet dans le tissu urbain ;
- d'ingénieurs agronomes, forestiers, travaillant sur l'évaluation des zones agricoles et sylvicoles touchées par les variantes des projets ;
- d'ingénieurs de trafic, travaillant sur la prévision de l'évolution du trafic (flux et modes de transport) et proposant les modes de raccordement aux réseaux de voirie préexistants, ainsi que la signalisation ;
- d'acousticiens, travaillant sur la prévision des niveaux sonores correspondant à l'évolution du trafic et à ses interférences avec l'environnement local : écrans constitués par les obstacles naturels présents ; zones occupées par des populations sensibles (zones d'habitation ; hôpitaux...), ainsi que sur les solutions de réduction d'impact passives (murs antibruit, revêtements routiers) et actives (actions sur le trafic).

A travers le travail des projeteurs routiers, le bureau d'étude intègre l'ensemble des avis des spécialistes ci-dessus afin de produire une vision d'ensemble des effets des variantes des projets routiers dans toutes les thématiques énoncées. Leur travail porte sur la conception de la route (travaux de terrassement et de chaussées), sur les ouvrages de franchissement (passages supérieurs et inférieurs), sur les ouvrages hydrauliques, les systèmes d'éclairage et

de signalisation et toutes les mesures de réduction d'impact dans les différents domaines concernés (acoustique et écologique notamment).

### 2.1.2.2 Logiciels couramment utilisés

Les projeteurs routiers et les divers spécialistes ont à leur disposition différents outils de calcul et de représentation cartographique (en 2 ou en 3 dimensions) de leurs évaluations. Le Tableau 1.1 présente des outils typiques pour chaque « métier ». Les parties italiques indiquent les logiciels utilisés par le bureau d'étude SCE. La compatibilité avec d'autres logiciels est précisée dans la perspective de développement d'un outil d'évaluation.

Tableau 1.1 Logiciels spécialisés

<b>Spécialités</b>	<b>Logiciels</b>	<b>Usage</b>	<b>Précisions (compatibilité avec d'autres logiciels)</b>
<i>Hydrologie/Hydraulique</i>	HEC-RAS	Calcul et dimensionnement des ouvrages, analyse d'impact de ligne d'eau. Détermination des pertes de charge et courbes de remous	Compatibilité avec AutoCad
<i>Acoustique</i>	Artémis	Tracé des isophones à partir de points de mesures	Compatibilité avec Map Info
	Sound Plan	Modélisation du territoire et tracé des isophones. Calcul des solutions de réduction de bruit	Compatibilité avec Arc GIS
<i>Route</i>	Piste	Topographie des terrassements, profils en long et en travers	Compatibilité avec AutoCad
	Macao	Profils en long et en travers de la route	Compatibilité avec AutoCad
	Nova Point	Tracé des variantes de projets selon le profil en long et en travers (courbes et pentes limites), calcul des déblais/remblais	Compatibilité avec AutoCad
	Via Nova	Simulation en 3D de trajets.	Compatibilité avec le logiciel Sound Plan
<i>Systèmes d'Information Géographique</i>	Map Info	Cartographie (dessin) des territoires et de l'insertion des projets	
	Arc GIS et ses modules	Cartographie (dessin) des territoires et de l'insertion des projets, combinaison de couches par opérateurs mathématiques Utilisation de modules : ArcView (outil SIG complet dédié à la cartographie et l'analyse de données); ArcEditor (création et la mise à jour de données de géodatabases) ; ArcInfo (outil SIG qui propose des fonctions SIG et outils de géotraitement) ; Spatial Analyst (outils raster et vectoriels; modélisation spatiale ; algèbre spatial ArcGrid)	Compatibilité avec ArcGIS, Autocad, MapInfo

## 2.1.3 Contribution du bureau d'étude à l'avancement des projets

### 2.1.3.1 Contribution à la procédure d'instruction du projet

Dans la procédure d'instruction du projet routier, le bureau d'étude intervient aux trois étapes de l'étude d'APS que sont la présentation de l'opération prévue, la comparaison des variantes et la définition des principales caractéristiques de la variante proposée (Figure 1.1).

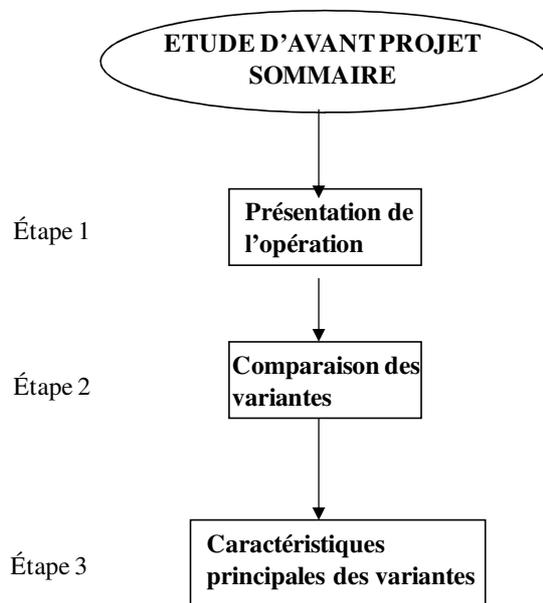


Figure 1.1 Trois étapes de l'étude d'avant projet sommaire

Dans le cadre de la présentation de l'opération, le bureau d'étude en aménagement :

- rappelle les objectifs de l'opération : réduction des nuisances, dynamique économique, amélioration de la fluidité du trafic local, compatibilité avec les schémas d'aménagements locaux...;
- rappelle les études et décisions antérieures (plusieurs années s'écoulent entre la planification et la réalisation d'une opération donnée) : vitesses de référence, dimensionnements des chaussées... ;
- présente une analyse des conditions de déplacement existantes : réseau, trafic, sécurité... ;
- présente une analyse des aspects socio-économiques : démographie, développement de l'habitat, des emplois et de l'activité... ;
- présente une analyse de l'état de l'environnement : périmètre de l'aire d'étude, composantes physiques (relief, cours d'eau...), composantes biologiques, urbaines, agricoles, patrimoniales et paysagères... ;
- présente une analyse des questions techniques spécifiques éventuelles : problèmes de contournement, franchissement d'obstacles...

Dans le cadre de l'étape de comparaison des variantes de tracé, le bureau d'étude :

- présente les caractéristiques générales de la zone étudiée et des variantes envisagées. Cette présentation s'appuie sur un ensemble de plans et profils à différentes échelles (plan général au 1/5000, profils en long au 1/5000 et 1/500, détails au 1/100) ;

- présente les ouvrages d'art prévus (passages inférieurs et supérieurs) ;
- présente les études (hydro)géologique et géotechnique ;
- présente les études hydrologiques et hydrauliques ;
- présente les évaluations socio-économiques et environnementales (milieu physique, naturel, impacts sur les activités agricoles et autres, impacts sur le patrimoine, le paysage...) des variantes ;
- fournit une estimation sommaire des coûts de réalisation de chaque variante (travaux de terrassement, de chaussée, échangeurs nécessaires, ouvrages de franchissement de cours d'eau, voies ferrées, déplacement de réseaux...) ;
- dresse le bilan des opérations de concertations ;
- réalise une analyse comparative des avantages et inconvénients des différentes variantes sur les plans économique, social et environnemental.

Cette étape se conclue par le choix d'une variante de tracé à partir de la discussion des avantages et inconvénients de chacune d'elles avec les différents acteurs du projet (concertation).

Dans le cadre de l'étape suivante, les caractéristiques de la variante choisie sont étudiées plus en détail. Cette étape implique de la part du bureau d'étude :

- une présentation de la solution retenue dans le contexte général de l'opération ;
- une étude socio-économique et environnementale du tracé : effets sur les trois plans, coût des mesures d'insertion... ;
- le rappel des caractéristiques géométriques du tracé (plans et profils en long et en travers) ;
- l'indication des caractéristiques des ouvrages d'échange et de rétablissement de voies de communications et de réseaux, ainsi que des éventuelles nouvelles voies de desserte ;
- l'indication des prévisions d'exploitation et d'entretien de la nouvelle infrastructure et des nouvelles communications créées ;
- l'indication des équipements de signalisation, de sécurité et de service aux usagers de la route ;
- le chiffrage du coût global et par phase de réalisation de l'aménagement ;
- l'indication des moyens de suivi des effets de l'infrastructure en termes d'effets sur l'environnement (nuisances sonores, suivi biologique, évolution des conditions de trafic, risques de pollution, évolution paysagère...).

### ***2.1.3.2 Méthode de réalisation des cartes par le bureau d'étude avec le logiciel ArcGIS***

Les données d'un projet routier sont présentées dans les rapports du bureau d'étude ou dans les rapports techniques du SETRA (1999). Ces données sont classées dans les thématiques suivantes :

- milieu physique ;
- milieu naturel ;
- contexte agricole ;

- milieu humain, urbanisme ;
- patrimoine paysage.

Pour chaque milieu, une échelle de 4 couleurs est définie pour caractériser le niveau de sensibilité du territoire. Le Tableau 1. 2 indique par exemple l'échelle de sensibilité et les couleurs correspondantes de deux thématiques : milieu physique et milieu naturel. Pour des raisons de simplicité des abréviations sont données aux 4 niveaux de sensibilité (TF, F, M, Fa).

Tableau 1. 2 Niveaux de sensibilité et couleurs correspondantes.

Echelle de sensibilité du milieu physique	Très forte	Forte	Moyenne	Faible
Echelle de sensibilité du milieu naturel	Très forte	Forte	Moyenne	Faible

Chaque enjeu est évalué par des spécialistes. Le Tableau 1. 3 présente par exemple pour le projet n° 1 utilisé comme cas d'étude, l'attribution des valeurs de sensibilité pour chaque enjeu.

Dans la pratique du bureau d'étude, un enjeu désigne la valeur prise par un usage, une fonction, un territoire ou un milieu naturel au regard de préoccupations écologiques, patrimoniales, paysagères, sociologiques, voire de considérations sanitaires ou de qualité de la vie.

Tableau 1. 3 Niveaux de sensibilité et couleurs correspondantes

Enjeux de l'eau et du milieu physique	Valeur et code couleur
Captages d'alimentation en eau potable et périmètres de protection rapprochés	TF
Cours d'eau, ruisseaux, mares et plans d'eau	TF
Zones inondables d'aléa très fort ou fort pour la rivière 1, d'aléa très fort pour la rivière 2	F
Cavités souterraines et risques de mouvements de terrain en zone d'aléa fort	F
Masses d'eau superficielle : vulnérables aux pollutions exploitée et donc sensible (rivière 1)	F
Zones inondables d'aléa moyen ou faible (rivière 1), d'aléa fort à moyen (rivière 2)	M
Risques de mouvements de terrain, liés aux cavités souterraines, en zone d'aléa moyen	M
Buttes topographiques (altitude > 72)	M
Autres zones d'aléa inondation faible ou zones concernées par les incertitudes inondations	Fa
Masse d'eau captive du Cénomaniens : peu vulnérable, nappe sensible car réservée à l'alimentation en eau potable	Fa
Masses d'eau souterraine Craie Séno-Turonien : vulnérabilité variable, faible sensibilité	Fa
Bassins versants : sensibilité générale face à l'objectif de bonne qualité des eaux	Fa

Le bureau d'étude représente toutes les données listées dans le Tableau 1. 3 sur une seule carte à l'aide d'ArcGIS afin d'obtenir la carte de sensibilité du milieu physique comme illustré par la Figure 1.2. Cette figure montre, pour un projet, les enjeux représentés par milieux suivant les 4 niveaux de couleurs correspondant aux différentes sensibilités et selon le code présenté au tableau ci-dessus. Ces cartes sont retracées pour la thèse.

Le milieu physique se compose des multiples données : topographie, eau, cavité,... Sur la Figure 1.2a on peut observer des zones foncées comme des zones sensibles fortes, voire même très fortes. Les zones claires sont des zones de moindre sensibilité. La Figure 1.2b montre l'importance des enjeux pour le milieu naturel, la Figure 1.2c pour le milieu urbanisme, la figure 1.2 d pour le patrimoine, la Figure 1.2e pour le paysage.

Enfin, SCE superpose toutes les cartes thématiques sur une carte à l'aide d'ArcGIS afin d'obtenir une carte de sensibilité du territoire (Figure 1.2f) ; qui est multicolore. A partir de cette carte, le bureau d'étude va déterminer des variantes de tracés susceptibles de passer dans les zones claires (zones de moindre sensibilité). L'ensemble des cartes nécessaires au tracé superposé en Figure 1.2f n'est pas fourni.

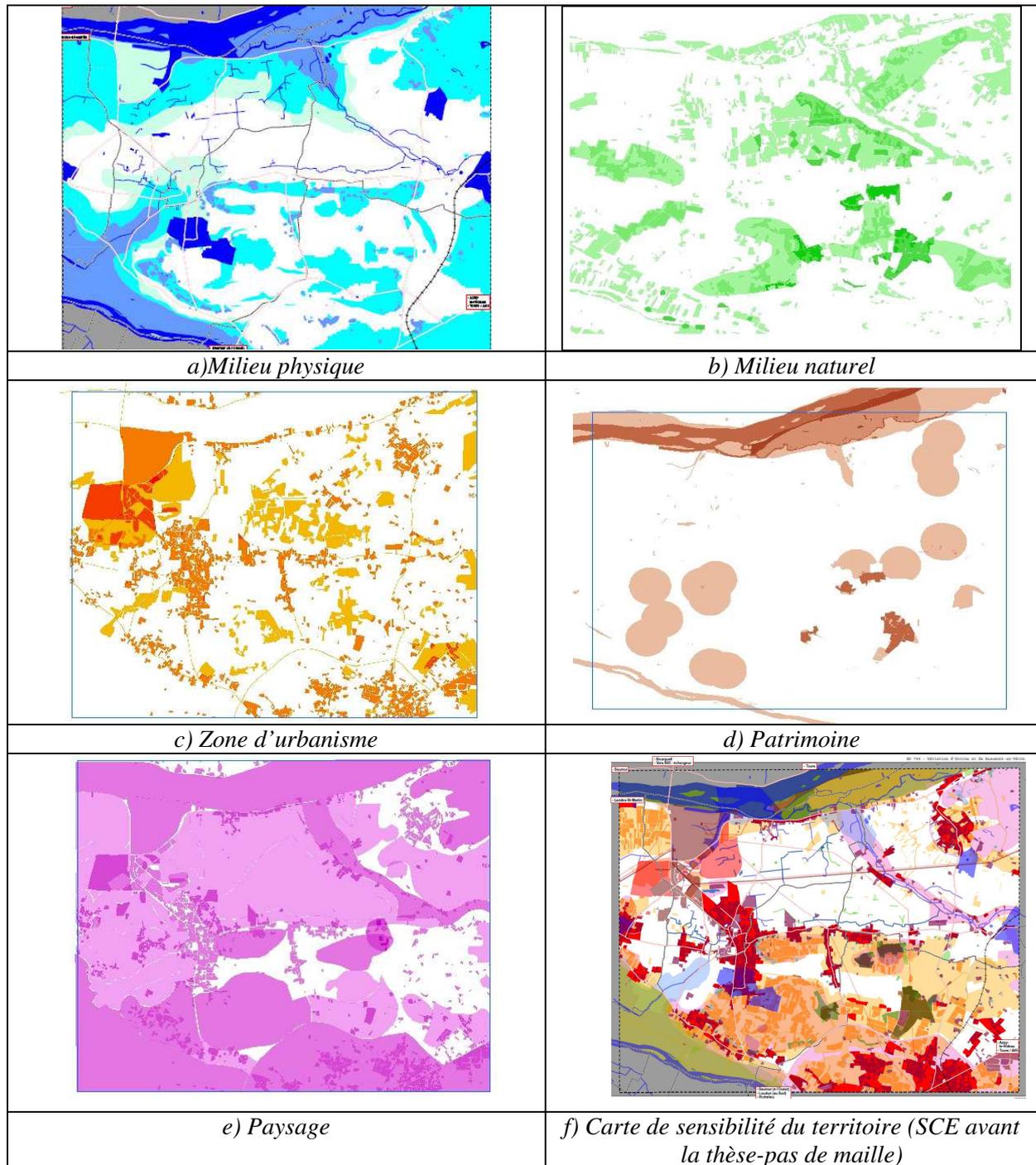


Figure 1.2 Carte de sensibilité des milieux physiques.

Selon le code couleur donnée dans le Tableau 1. 2 on note que pour le :

- milieu naturel : les couleurs des objets sont en vert (foncé ou clair en dépendant de niveau de sensibilité)
- contexte agricole : les couleurs des objets sont en jaune (foncé ou clair en fonction de niveau de sensibilité)
- milieu humain, Urbanisme les couleurs sont en orange (foncé ou clair en fonction de niveau de sensibilité)
- patrimoine : les couleurs des objets sont en brun (foncé ou clair en fonction de niveau de sensibilité)
- paysage : les couleurs des objets sont en violet (foncé ou clair en fonction de niveau de sensibilité)

Pour éviter de mélanger un trop grand nombre de couleurs en superposant les cartes, SCE prend en compte seulement des sensibilités de niveau « très fort » ou « fort ».

Dans ArcGIS, chaque enjeu est caractérisé par des rasters ou vecteurs. Les enjeux sont en fait les données d'entrées du logiciel pour un projet routier. Chaque enjeu est évalué et ainsi classé en des niveaux des sensibilités différentes : très fort, fort, moyen, faible. Cette évaluation est réalisée par des experts (environnement, génie civil...).

En résumé, on réalise d'abord les cartes de sensibilité de chaque enjeu (cf Tableau 1. 2), ensuite on les pondère pour obtenir une carte de sensibilité de la thématique (cf milieu physique en Figure 1.2a). Enfin, on superpose toutes les cartes thématiques afin d'obtenir la carte de sensibilité totale du territoire.

### ***2.1.3.3 Supports cartographiques d'identification des variantes du projet***

On présente un exemple pour illustrer le travail du bureau d'étude à cette étape. Le bureau d'étude réalise une carte thématique de sensibilité et l'exploite comme suit.

Afin de représenter les caractéristiques du territoire dans lequel doit s'insérer le projet et de représenter les effets du projet sur ce territoire, et afin de permettre la discussion entre les acteurs du projet, le bureau d'étude doit élaborer différents documents cartographiques thématiques.

Concernant en particulier la question de l'insertion du projet et de ses variantes de tracé dans la zone d'étude, le bureau d'étude doit réaliser en premier lieu la carte de sensibilité du territoire. Cette carte constitue la synthèse de la somme d'informations disponibles sur le territoire pour les différents thèmes environnementaux : milieu physique (relief, géologie, mouvement terrain...), milieux naturels, eaux de surface et souterraines, patrimoine, occupation du sol (agriculture, habitations, loisirs...), paysage, etc.

Pour réaliser la carte de sensibilité, le bureau d'étude utilise l'ensemble des données préexistantes dans les différents domaines, qu'il peut obtenir auprès des acteurs du territoire ou à partir de ses propres investigations. La Figure 1.2f présente un exemple de carte de sensibilité. Les nuances de couleur (bleu, rouge, vert, jaune) correspondent donc à différentes thématiques superposées. L'intensité des couleurs correspond au degré de sensibilité dans le thème. La carte de sensibilité présente des zones moins colorées, voire totalement blanches, qui apparaissent comme les zones du territoire de plus faible sensibilité.

La finalité de la mise en évidence des zones de moindre sensibilité est de faire ressortir les secteurs les plus propices à l'insertion de l'infrastructure routière. La mise en relation de

ses zones entre les deux extrémités du projet permet de tracer les « fuseaux de moindre sensibilité ». Ces derniers sont plus ou moins étendus latéralement. Ils sont aussi plus ou moins ramifiés en fonction de la disposition des zones de moindre sensibilité. Il se peut que la mise en relations des zones de moindre sensibilité (blanches ou très claires) nécessite de passer dans des zones plus sensibles. La longueur de passage à travers ces zones est minimisée. La Figure 1.3 présente (en gris) les fuseaux de moindre sensibilité extraits de la cartographie précédente (Figure 1.2f).

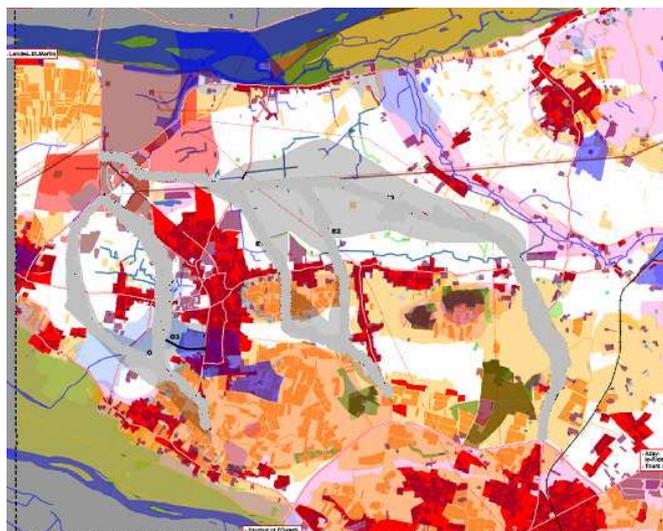


Figure 1.3 Exemple de fuseaux de moindre sensibilité proposés (zones grises au centre).

A partir des fuseaux de moindre sensibilité, le bureau d'étude propose des variantes de tracé. Celles-ci sont plus ou moins ramifiées en fonction des connexions entre les fuseaux. La Figure 1.4 présente (en noir) les variantes proposées à partir des fuseaux. Dans le cas présenté, les variantes aboutissent en différents (3) points d'un axe routier à rejoindre. Les variantes sont tracées en tenant compte des normes techniques pour la conception des routes (profil en long et en travers, rayons de courbure, raccordement des courbes). Ce travail relève des projeteurs routiers.

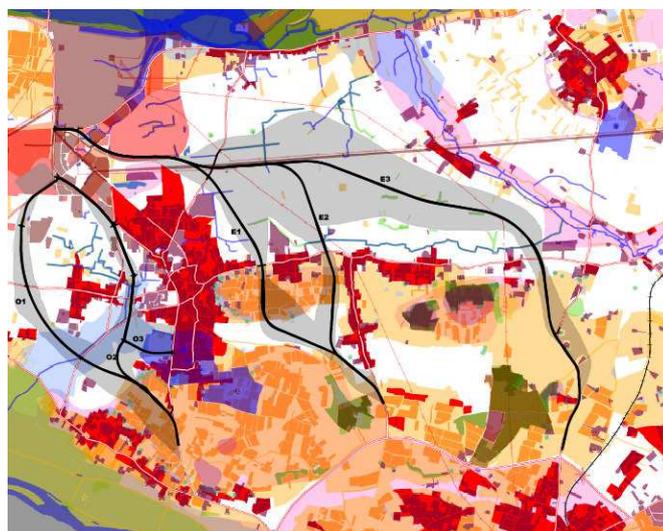


Figure 1.4 Variantes de tracé proposées.

### 2.1.3.4 Support de comparaison des variantes

La représentation cartographique intègre et synthétise de nombreuses couches d'information. Chaque variante touche différemment les divers milieux et enjeux. La seule observation des cartes ne permet pas d'analyser les effets (avantages et inconvénients) de chaque variante.

Aussi afin de permettre la comparaison des variantes, chaque spécialiste thématique du bureau d'étude va ensuite évaluer chacune d'elles selon ses propres critères (aspects environnementaux, socio-économiques, techniques). Ces évaluations seront ensuite discutées et comparées avec les acteurs du projet dans le cadre de la concertation. Cette étape d'évaluation par thème intègre aussi la prévision d'éventuelles mesures compensatoires des impacts et de leur efficacité (ex : mesures de réduction des nuisances acoustiques, passage à faune, restauration de milieux, champs d'inondation...).

L'ensemble des résultats d'évaluation de chaque variante (thème par thème) et des mesures de compensation éventuelles est présenté de manière synthétique à l'ensemble des acteurs sous forme de tableaux de comparaison. Pour chaque variante, les différents thèmes, déclinés en divers critères plus précis, reçoivent une notation par les spécialistes. Les dimensions des critères pouvant être très différentes, les niveaux d'intérêt (avantages) et d'inconvénient de chaque tracé peuvent être représentés suivant un code de couleur plus accessible à la compréhension par les non spécialistes et le public. La vision d'ensemble ainsi élaborée par l'ensemble des spécialistes est ensuite analysée et discutée avec les acteurs dans le cadre de la concertation. Afin de fournir une référence aux acteurs, l'état zéro (situation existante) peut aussi être évalué selon les mêmes critères que les variantes.

Le Tableau 1. 4 présente un exemple d'extrait de tableau de comparaison de variantes de projet et de l'état de référence. Pour chaque projet, une liste de critères (colonne de gauche) est retenue par les spécialistes thématiques du bureau d'étude pour faire évaluation finale du projet. Afin de progresser dans le processus de décision par élimination progressive de variantes, les acteurs peuvent éventuellement étudier la sensibilité du résultat total à la prise en compte ou non de tel ou tel critère. Les critères pris en compte peuvent être liés tant à la dimension environnementale qu'aux deux autres dimensions du développement durable : aspects sociaux et économiques (OFROU, 2002 ; CGN et al, 2006 ; CERTU, 2006).

Tableau 1. 4 Tableau de comparaison de variantes et de la référence

	Echelle de sensibilité	Très défavorable	Défavorable	Favorable	Très Favorable		
Familles Variantes	Actuel 0	1	Grand Ouest 2 3		4	Ouest rapproché 5	Est 6
<b>Dimension: Vie sociale et économique</b>							
Vie des territoires							
Approche économique globale							
Approche économique locale							
Identité culturelle							
<b>Dimension: Aménagement de l'espace</b>							
Accessibilité et mobilité							
Sécurité et risques							
<b>Dimension: Homme et Terre</b>							
Qualité des ambiances et santé							
Milieux naturels et biodiversité							
Ressources - matériaux, énergie, eau et sol							

La variante retenue à l'issue de ce processus sera ensuite étudiée de façon plus détaillée, tel que décrit précédemment.

### **2.1.3.5 Relations du bureau d'étude avec les acteurs du projet routier**

Tout au long du processus d'instruction du projet, le bureau d'étude est en relation avec le maître d'ouvrage dont il est contractant et auquel il rend compte dans le cadre de l'élaboration des dossiers de déclaration d'utilité publique (DUP), d'avant-projet (AVP), de projet, voire de consultation des entreprises (DCE). Il peut prendre en charge le suivi des travaux de réalisation du projet (relations avec les entreprises). Qu'il soit ou non sous-traitant du maître d'œuvre, le bureau d'étude est en relation avec ce dernier pour les questions relatives aux effets des travaux et phasages dans le fuseau du projet. En phase de concertation, et en particulier lors de la présentation des zones de moindre sensibilité, des variantes de tracé et de leur évaluation, le bureau d'étude est en relation avec tous les acteurs locaux du projet (acteurs publics et privés, riverains, usagers, associations diverses...). Au préalable, le travail de collecte de données sur la zone d'étude a nécessité la rencontre du bureau d'étude avec les divers acteurs et groupes d'intérêt qui y résident (travail de terrain).

La Figure 1.5 récapitule de façon synthétique l'action du bureau d'étude tout au long du processus de recherche du tracé optimal dans un territoire donné (stades A à F).

- Au stade A, les acteurs (maître d'ouvrage, maître d'œuvre, riverains, associations, élus...) identifient les enjeux relatifs à chaque thème et les pondèrent (afin de permettre leur hiérarchisation). L'ensemble des thèmes (superposition) permet d'élaborer la carte de sensibilité.
- Au stade B, le maître d'ouvrage avec l'appui du bureau d'étude (spécialistes et projeteurs) identifie les fuseaux de moindre sensibilité.
- Au stade C, le bureau d'étude (spécialistes et projeteurs) propose les variantes de tracé dans les fuseaux.
- Au stade D, le maître d'ouvrage avec l'ensemble des acteurs, établit le choix des critères (indicateurs) à utiliser pour évaluer les variantes sur les différents thèmes. L'évaluation du projet brut est réalisée selon ces critères.
- Au stade E, l'évaluation est réalisée en tenant compte des mesures compensatoires proposées sur les différents thèmes.
- Au stade F, les variantes « compensées » sont comparées conjointement par l'ensemble des acteurs. Le bureau d'étude intervient notamment pour expliquer les résultats de l'évaluation critère par critère et pour expliciter les avantages et inconvénients de chaque variante, ainsi que les solutions ou suggestions d'aménagement local.

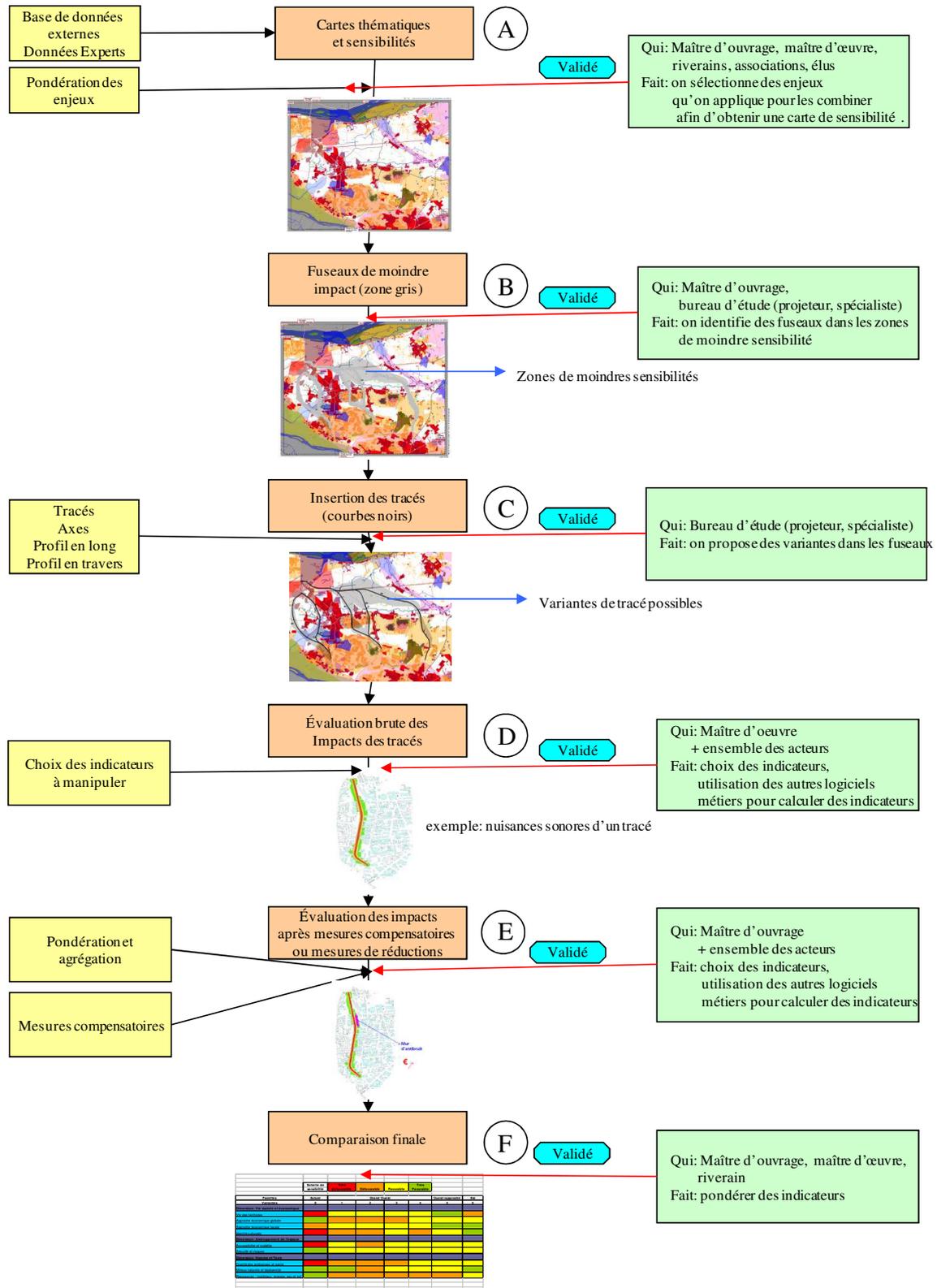


Figure 1.5 Processus d'identification et d'évaluation d'un tracé routier.

## **2.2 Acteurs du projet routier**

Dans le cadre de la réalisation de sa mission, le bureau d'étude est en relation avec l'ensemble des acteurs des projets routiers. Ceux-ci sont présentés ci-dessous.

### **2.2.1 Maître d'ouvrage**

Il est le donneur d'ordre au profit de qui l'ouvrage est réalisé. Le maître d'ouvrage est une personne morale (direction centrale ou régionale, collectivité communale, entreprise d'aménagement,...). Il existe le maître d'ouvrage privé libre (les particuliers, les promoteurs) ou réglementé (les sociétés d'économie mixte) et le maître d'ouvrage public (Etat et collectivités territoriales) dont le statut est précisé par la loi du 12 juillet 1985, dite loi « MOP » (maîtrise d'œuvre privée). L'objet de cette loi est de présenter la répartition des rôles et des responsabilités entre le maître d'ouvrage public, les maîtres d'œuvre privés et les entrepreneurs.

Le maître d'ouvrage est généralement responsable de l'administration routière. Le maître d'ouvrage finance la réalisation de l'infrastructure et choisit qui en sera le futur exploitant. Il décrit les besoins, le cahier des charges et organise le planning général des projets.

Le maître d'ouvrage fait appel à un maître d'œuvre (MOE) interne et/ou externe pour obtenir les produits (matériels, logiciels, services et solutions) nécessaires à la réalisation de sa mission. Par exemple : pour un projet routier national, le maître d'ouvrage est la Direction régionale de l'Équipement (DRE) et le maître d'œuvre interne est la Direction interdépartementale des routes (DIR). Dans le cas où le maître d'ouvrage fait un marché public pour trouver d'autre maître d'œuvre, il s'agit d'un maître d'œuvre externe.

Le maître d'ouvrage a la responsabilité de piloter le projet. Il mène ou commande des études préliminaires, des études d'avant projet sommaires, étude de projet. Il a le rôle de connecter tous les acteurs concernés grâce à des concertations, des réunions de pilotage,...

Le maître d'ouvrage décide des actions à mener après en avoir discuté avec les autres acteurs. Dans certains cas, le maître d'ouvrage peut chercher une assistance à l'extérieur. Par exemple, si le maître d'ouvrage est un service administratif qui n'a pas suffisamment d'experts dans le domaine routier, il doit alors chercher un bureau d'étude privé par le marché public. Le maître d'ouvrage lui demande de devenir son assistant. Cet assistant aide le maître d'ouvrage dans les travaux : réalisation du cahier des charges, consultations juridiques, organisation du planning, conduite de projet...

### **2.2.2 Maître d'œuvre**

C'est une personne physique ou morale comme par exemple la Direction interdépartementale des routes (DIR), la Direction de l'aménagement, des sociétés d'ingénierie de l'aménagement telles que SCE,... qui assurent la bonne réalisation des études.

Le maître d'œuvre réalise l'étude d'avant-projet (à partir du cahier des charges du maître d'ouvrage, il collecte et traite les données dont il dispose, et propose des variantes de tracé) et l'étude de projet (le maître d'œuvre demande au bureau d'étude de faire la conception de la variante choisie selon des normes et le cahier des charges). Le maître d'œuvre assiste le maître d'ouvrage pour la passation des contrats de travaux, l'assistance apportée au maître de l'ouvrage lors des opérations de réception. Il assure pleinement la direction de l'exécution ou des contrats de travaux. Le maître d'œuvre propose une solution technique qui permet de réaliser l'opération, dans l'enveloppe budgétaire et les délais qui lui sont assignés.

Pour les projets importants ou dans le cas où le maître d'œuvre manque d'experts dans un domaine quelconque, il fait appel à d'autres entreprises (bureau d'étude d'environnement, d'infrastructure....)

Le maître d'œuvre réalise le dossier de DUP et l'étude d'avant projet. A partir du cahier des charges du maître d'ouvrage, le maître d'œuvre collecte et traite des données, propose des variantes de tracé et réalise l'étude de projet. Le maître d'œuvre demande au bureau d'étude de faire la conception de la variante choisie selon les normes techniques et le cahier des charges.

Le maître d'œuvre est obligatoirement indépendant de tout entrepreneur qui est choisi par appel d'offres préparé et lancé par le maître d'œuvre et le maître d'ouvrage. Les entreprises remettent leur offre selon les conditions fixées à l'appel d'offre. Après analyse de l'ensemble des offres par le maître d'œuvre et le maître d'ouvrage, le maître d'ouvrage désigne l'entreprise qui exécutera les travaux en lui attribuant le marché.

Enfin, lorsque l'entrepreneur exécute les travaux, le maître d'œuvre dispose de compétences pour contrôler la qualité de la construction, la technologie et les matériaux utilisés.

### 2.2.3 Entrepreneur

L'entrepreneur est une entreprise d'exécution des travaux publics (Charier, Guintoli, Colas, Eurovia, Screg...) disposant des équipements (engins de terrassement, centrales de malaxage, camions, excavateurs...) et du personnel (ouvriers, ingénieurs, responsables du chantier...) qualifié pour réaliser les travaux selon le planning du cahier des charges.

Les entrepreneurs sont choisis par le maître d'ouvrage par appel d'offres. Dans ce marché public, les entrepreneurs déposent leurs dossiers présentés le budget et des technologies qu'ils possèdent.

Pour un projet important (route nationale par exemple), un entrepreneur principal va chercher d'autres entrepreneurs secondaires pour répartir le travail. Cela s'effectue au travers d'un marché public.

D'autre part, l'entrepreneur cherche des fournisseurs des matériaux de construction (ciment, enrobés ...) et des matériels (engins, équipements).

Le travail de l'entrepreneur consiste en :

- la réalisation des dossiers pour déposer au maître d'œuvre et maître d'ouvrage : l'entrepreneur se base sur sa capacité pour distribuer ses engins et travailleurs suivant le planning. Il réalise le travail dans un budget limité. Le schéma d'exécution et les dessins de conception doivent être bien préparés et détaillés ;
- le terrassement : la route sur le territoire crée des déblais et remblais. Suivant la conception de projet, l'entrepreneur établit un planning de travaux de terrassement. Ce planning détermine le nombre d'engins, les types d'engins utilisés, et le calendrier de travail pour qu'on économise le temps de déplacement des véhicules et des sols utilisés ;
- l'exécution de la plateforme : l'entrepreneur détermine le nombre de passages sur les couches de sol et matériaux utilisés pour obtenir une bonne compacité ;
- l'exécution de la chaussée : les entrepreneurs respectent l'utilisation des matériaux de la chaussée, le nombre de passages des engins pour que la chaussée obtienne la résistance voulue ;

- l'installation des équipements (électricité, eau, communication) : l'entrepreneur achète ces matériels et les installe sur le site de construction ;
- l'installation des zones de loisirs, des cabines d'appel d'urgence : elles sont des lieux immanquables pour des voyageurs dans son parcours : se reposer, appeler au secours lorsqu'il y a des accidents ;
- le maintien de la route : pour des grands projets, la responsabilité de l'entrepreneur ne s'arrête pas à l'étape de construction de la route, mais aussi à l'étape d'exploitation dans une période de temps donnée (5 ou 10 ans).

#### **2.2.4 Fournisseurs**

Ce sont des acteurs qui fournissent des matériels (engins) ou des matériaux de construction à l'entrepreneur. Ils doivent assurer la qualité des matériaux et leur fourniture en quantité requise.

#### **2.2.5 Acteurs administratifs**

Ils proviennent de différents services de l'administration publique. Ils travaillent dans différentes domaines : aménagement du territoire, environnement, transports, économie, agriculture, finance... Ils vérifient la conformité du projet d'infrastructure routière avec les lois, les ordonnances, les schémas directeurs, etc.

#### **2.2.6 Public**

Il comprend l'ensemble des acteurs concernés par la future infrastructure routière : riverains, exploitants agricoles, forestiers, etc. Ces acteurs peuvent se grouper en associations. Les associations ont pour but de défendre certaines valeurs environnementales, sociales ou économiques. Elles peuvent également être soucieuses de la conservation et de la protection des sites naturels et des espèces. Il existe aussi des associations en faveur du développement des infrastructures en tant qu'outil de développement économique (facilitation et accélération des échanges).

Les préoccupations du public ne sont pas constantes au cours du cycle de vie d'une infrastructure. Elles dépendent de la confiance au maître d'ouvrage et maître d'œuvre et varient suivant 5 phases :

1. La phase de pré-développement : à cette étape, l'intérêt et l'attention du public débute dès qu'on entend les premières rumeurs concernant la réalisation d'une nouvelle route. Il y a des moments où la préoccupation atteint le niveau maximum ;
2. La phase de construction : en général, durant cette phase les préoccupations du public s'avèrent relativement faibles, celui-ci semblant se résoudre à accepter la décision ;
3. Le début de la phase de croissance des préoccupations concorde avec la reconnaissance d'impact négatif lors de l'exploitation de la route. Elle peut survenir immédiatement après la phase de construction ou un peu plus tard selon le degré d'acceptation du projet par le public ;
4. Phase de résolution de conflit : une concertation entre les acteurs pour conclure qu'il est nécessaire de corriger un aspect du projet ou non ;
5. Phase de l'acceptation de la solution.

Il y a 3 situations possibles pour le public :

- Etat affecté : l'individu agira pour que le projet ne se réalise pas car il y a une divergence avec ses valeurs ;
- Etat préservé ou amélioré : l'individu agira pour que le projet prenne forme car il y a une convergence avec ses valeurs ;
- L'individu ne se fait pas d'avis par manque d'informations.

### **2.2.7 Utilisateurs de l'infrastructure**

Ils constituent une partie particulière du public en tant qu'usagers bénéficiaires de la future infrastructure routière : diminution des temps de parcours, transport en plus grande sécurité, avec plus de confort, accès à de nouvelles zones.

Dans le cas des infrastructures dont l'accès est payant (telles que les sections d'autoroutes, certains ponts et tunnels), les utilisateurs contribuent à une partie du financement à travers le péage, complétant ainsi plus ou moins le financement indirect par l'impôt.

Les associations d'usagers doivent être intégrées dans l'étude du projet. Elles comprennent :

- Des associations d'usagers de transports individuels, motorisés (automobilistes, cyclomotoristes) ou nons (cyclistes) ;
- Des associations d'usagers des transports collectifs (tramway, bus) ;
- Des associations à but économique intéressées par l'augmentation de capacité (volume et vitesse) de transport favorisant les échanges commerciaux ;
- Des associations œuvrant pour la sécurité routière.

## **3 ANALYSE DES BESOINS**

### **3.1 Besoins du bureau d'étude**

Les différentes compétences (spécialistes et projeteurs) du bureau d'étude sont mobilisées à différents stades du processus d'identification et d'évaluation des tracés routiers comme illustré en Figure 1.5.

Au cours de ce processus, des échanges sont nécessaires :

- en interne, entre les spécialistes et les projeteurs ;
- avec les acteurs du projet dans le cadre de l'acquisition de données, de la concertation et de l'aide à la décision.

Afin de fournir un support à ce processus en termes de réalisation et de modification de documents cartographiques thématiques d'aide à la décision, un outil logiciel peut être envisagé. Il pourrait être supporté par un système d'information géographique.

Pour l'étape d'élaboration de carte de sensibilité du territoire, d'un tel outil, le bureau d'étude souhaiterait qu'il puisse intégrer les données numériques de différentes bases thématiques : caractéristiques du milieu physique, du milieu naturel, sociologiques, patrimoniales, paysagères... L'outil permettrait à partir de ces données de réaliser des cartes thématiques. L'expertise du bureau d'étude étant notamment de savoir apprécier, selon les territoires traversés, l'importance relative des différentes thématiques, l'outil permettrait de

pondérer chaque « couche thématique » avant de les superposer pour en constituer la « somme » sous forme de carte de sensibilité du territoire.

Pour l'étape de recherche des fuseaux de moindre sensibilité, l'outil permettrait, à partir des zones les moins marquées par la sommation des couches thématiques, de faire ressortir et tracer les zones les plus propices et de les relier entre elles, soit par le plus court chemin, soit en passant par des zones simplement légèrement plus marquées. Les fuseaux apparaîtraient ainsi automatiquement.

Pour l'étape d'insertion des tracés, en suivant les consignes fournies par les normes en matière de profil en long et de rayons de courbures, l'outil pourrait tracer à l'intérieur des fuseaux l'ensemble des variantes possibles du point de départ au point d'arrivée.

L'évaluation des impacts de chaque tracé pourrait ensuite être réalisée avec les logiciels classiques des différents spécialistes. Un des intérêts de l'outil serait de représenter autant que possible les effets de façon spatiale.

Les logiciels classiques et la représentation spatiale des différents effets prévus pour chaque tracé permettent au bureau d'étude de proposer différentes solutions en matière de mesures compensatoires et de les discuter avec les acteurs du projet. L'outil permettrait l'évaluation des impacts résiduels de chaque tracé après mise en œuvre des mesures compensatoires : valeur absolue et gain par rapport à l'évaluation dite « brute » de l'étape précédente.

Pour l'étape de comparaison des variantes, l'outil permettrait d'extraire pour chaque thématique les valeurs d'évaluation de chaque variante et de les reporter dans un tableau comparatif. Ce dernier, sur la base du modèle du Tableau 1. 4 permettrait de combiner l'ensemble des évaluations thématiques de chaque variante de tracé. Dans le cadre de la concertation, en fonction des échanges entre acteurs (débat public), la sensibilité du classement des variantes vis-à-vis de l'importance donnée à chaque thématique pourrait être testée en affectant à chacune d'elles des coefficients de pondération compris entre 0 et 1. L'analyse de la réponse à différents jeux de pondérations permettrait de faire ressortir la ou les solutions de tracé les plus favorables.

Afin d'enrichir les discussions avec les acteurs, de mieux formaliser les critères d'évaluation des territoires traversés par le projet routier (définition des zones de moindre sensibilité), et aussi d'enrichir ou de mieux formaliser les critères de choix des variantes de tracé (pris en compte à la fin dans le tableau de comparaison des variantes), l'outil pourrait intégrer des indicateurs supplémentaires à ceux de la procédure d'évaluation classique. Les besoins du bureau d'étude s'expriment donc aussi en termes de recherche de nouveaux indicateurs relatifs tant à des aspects socio-économiques et environnementaux que techniques. A partir des pratiques et des questions concrètes usuellement discutées avec les acteurs pour aider aux choix de tracés, des indicateurs nouveaux doivent donc être intégrés dans l'outil.

En réponse à la Figure 1.5, la Figure 1.6 représente de façon simplifiée la formalisation des besoins du bureau d'étude en termes d'aide aux étapes du processus d'identification et d'évaluation des tracés routiers. Incluant des interactions internes (entre spécialistes et projecteurs du bureau d'étude) et des interactions externes (avec l'ensemble des acteurs), l'outil servirait dans une première phase à l'identification des fuseaux de moindre sensibilité, et dans une seconde phase à l'évaluation des tracés possibles. L'outil permettrait ainsi de faciliter :

- la réalisation des cartes thématiques et de sensibilité ;
- la recherche des fuseaux de moindre sensibilité ;

- l'insertion des tracés envisageables dans les fuseaux identifiés ;
- l'évaluation brute des tracés ;
- l'évaluation des tracés après mise en œuvre des mesures compensatoires ;
- la comparaison finale des tracés.

La Figure 1.6 indique les étapes d'interactivité avec les acteurs du projet : celle nécessaire à la détermination consensuelle d'importance relative des enjeux sur le territoire (pondération des enjeux relatifs aux différentes thématiques), celle nécessaire à la sélection des indicateurs devant être pris en compte dans l'évaluation des tracés, celle nécessaire à la pondération des résultats (thématiques) de l'évaluation brute, celle nécessaire à discussion des mesures compensatoires et des impacts résiduels pour le choix final.

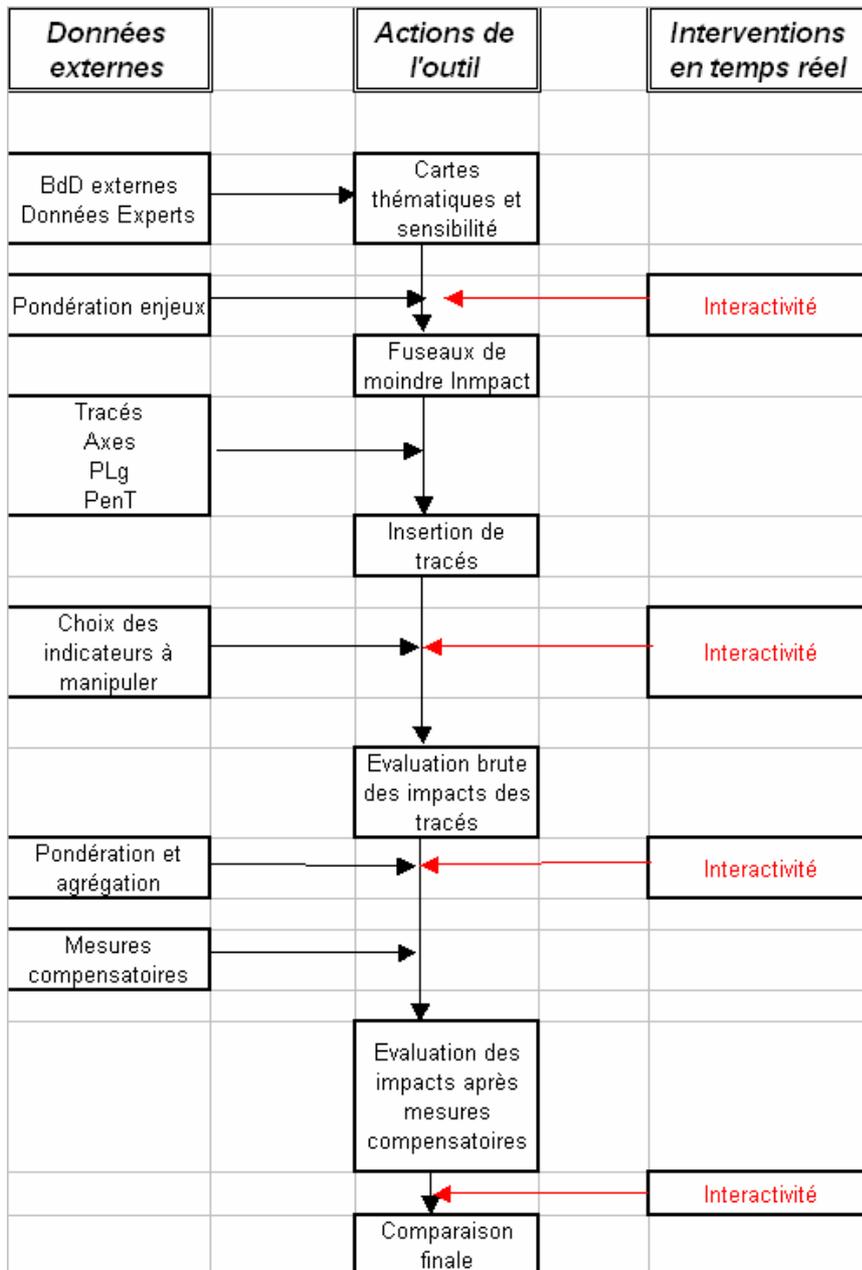


Figure 1.6 Schéma de réponse aux besoins du bureau d'étude

## **3.2 Besoin de méthodes**

Le projet routier lie toujours plusieurs critères. Il est difficile donc d'évaluer un projet routier. Un outil aide à la décision avant et pendant le projet est alors nécessaire. Ainsi, ces méthodes peuvent résoudre des conflits entre des acteurs ou répondre à leurs besoins.

Dans le contexte du développement durable, on s'intéresse au développement des méthodes qui prennent en compte les objectifs économiques, environnementaux et sociaux du projet.

Lors de la perfection d'une telle méthode ou outil, le temps et le coût du déroulement d'un projet routier diminueront et la confiance dans l'optimalité du projet est assurée.

Il existe plusieurs méthodes d'évaluation d'un projet. Certaines méthodes se basent sur un système de critères et ces méthodes doivent prendre en compte les opinions des acteurs. Elles sont néanmoins qualitatives. Cela cause des difficultés lors de la combinaison des critères car le résultat de cette évaluation est normalement un tableau avec des couleurs à partir desquelles est prise une décision. Les autres méthodes ont pour le but de surmonter ces limites. Toutefois, ces méthodes ne traitent que des indicateurs spécifiques.

Afin d'avoir une méthode plus complexe, il est nécessaire d'intégrer des logiciels spécifiques pour le calcul d'indicateurs et appliquer le modèle de pondération des indicateurs différents et eux même (Piantanakulchai, 1998).

## **3.3 Bilan des méthodes d'évaluation disponibles**

### **3.3.1 Grille RST02 (France)**

Cette méthode proposée par le Centre d'Etudes sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques (CERTU, 2006a,b ) est caractérisée par une grille de lecture du développement durable dite « grille RST02 ». Elle est un outil de questionnement et d'analyse, destiné à mettre en évidence les points faibles et les points forts d'un projet en regard de critères du développement durable. A l'aide d'un recueil de questions, la grille permet de qualifier un projet via une analyse multicritères. Grâce aux modules et sorties graphiques spécialement développés sous Microsoft Excel, cette grille peut être utilisée pour améliorer un projet.

La limite de cette méthode est que la grille est constituée par les critères pour un projet d'aménagement général, et non pour un projet routier avec des caractéristiques spécifiques. La méthode est une évaluation qualitative.

### **3.3.2 Méthode NISTRA (Suisse)**

Cette méthode a été développée par l'Office Fédéral des Routes de Suisse (OFROU, 2002). Elle prend en compte les trois dimensions du développement durable à travers de nombreux indicateurs, groupés en 3 principaux types :

- Indicateurs monétarisables (dits « KNA ») ;
- Indicateurs quantifiables mais non monétarisables (« NWA ») ;
- Indicateurs non quantifiables enregistrés sous une forme non agrégée en tant qu'information supplémentaire (« DES »).

La Figure 1.7 présente ces 3 types d'indicateurs pour les dimensions environnementales (U), sociales (G) et économiques (W).

Indicateur	Unité	KNA	NWA	DES
G111 Durée du trajet vers le centre régional appartenant à une région bénéficiant de la LIM, pondérée par le nombre d'habitants	personnes-minutes		■	
G121 Attractivité pour les piétons	points		■	
G122 Attractivité pour les cyclistes	points		■	
G123 Attractivité des transports publics	points		■	
G211 Accidents	nombre / an	■		
G212 Victimes d'accidents (blessés et décédés)	personnes / an	■		
G241 Confort dans les zones urbaines et les centres en milieu rural	points		■	
G251 Effets territoriaux de la répartition	descriptif			■
G311 Aspects liés à la participation de la population	points		■	
G312 Degré de concordance avec les plans d'urbanisme	points		■	
W111 Coûts annuels du capital (moyenne)	CHF / an	■		
W112 Frais d'exploitation	CHF / an	■		
W113 Frais d'entretien	CHF / an	■		
W121 Modification de la durée du trajet pour le trafic voyageurs dans la région	personnes-heures / an	■		
W122 Modification de la durée du trajet pour le transport de marchandises dans la région	personnes-heures / an	■		

Indicateur	Unité	KNA	NWA	DES
W123 Modification des coûts fixes liés aux véhicules pour le trafic commercial et le transport de marchandises	Heures d'engagement / an	■		
W124 Modification des coûts variables liés aux véhicules pour le trafic voyageurs et de marchandises	véhicule-kilomètres ou litres / an	■		
W125 Risque d'embouteillage / temps de réserve	véhicule-kilomètres / an		■	
W126 Kilomètres parcourus, pondérés suivant le standard d'aménagement de la route (confort des usagers)	véhicule-kilomètres / an		■	
W131 Durée de réalisation	descriptif ou années			■
W132 Risque de dépassement des coûts	CHF / an	■		
W133 Risques liés à la technique de construction	descriptif			■
W134 Réalisation par étapes	descriptif			■
W211 Degré d'attractivité sur la base des modifications de la durée du trajet	points		■	
W221 Durée du trajet entre les villes principales, pondérée par le nombre d'habitants	points		■	
W231 Avantages et inconvénients de l'amélioration de la desserte	descriptif			■
W241 Effets de l'innovation dans la construction ou dans la gestion du trafic	descriptif			■
U111 Emission de NOx	tonnes de NOx / an	■		
U112 Emissions de PM10	tonnes de PM10 / an	■		
U121 Personnes exposées à un bruit excessif à leur domicile	personnes	■		
U122 Surfaces exposées à un bruit excessif dans des zones de protection ou de détente	hectares		■	
U131 Utilisation du sol	hectares	■		
U141 Effets de la fragmentation hors des centres urbains	kilomètres		■	
U142 Paysage et image du site	points	■		
U151 Pollution des eaux	véhicule-kilomètres TMD / an		■	
U211 Emissions de gaz à effet de serre	tonnes de CO2 / an	■		
U311 Consommation d'énergie	MWh / an	■		
U321 Consommation de gravier non concassé	mètre cube		■	

Figure 1.7 Type d'indicateurs de Nistra (OFROU, 2002).

### **Possibilités et limites d'une évaluation Nistra**

La méthode de NISTRA permet de :

- évaluer des projets routiers suivant les critères du développement durable ;
- procéder à une évaluation monétaire justifiable ;
- résumer des informations sous une forme compacte qui facilite les décisions des acteurs.

Toutefois, les calculs d'indicateurs sont encore globaux et ne peuvent pas résoudre tous les conflits locaux sur le territoire. Il existe des indicateurs difficiles à pondérer (ex : nuisances sonores, pollution d'air, fragmentation des écosystèmes...)

### **3.3.3 TransCAD (France)**

Cette méthode a été développée par le Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes en France (SETRA, 2010). Le logiciel TranCAS permet d'intégrer un programme de calcul des critères socio-économiques du transport sur la base de prix-temps. Son but est de trouver pour chaque couple « origine-destination » l'ensemble des chemins efficaces en comparant leur prix et leur temps de parcours et en utilisant une répartition continue suivant une fonction des valeurs du temps des usagers.

Le calcul est constitué de 2 étapes :

- 1<sup>ère</sup> étape : affectation du prix-temps par le logiciel du SETRA ;
- 2<sup>e</sup> étape : exportation des résultats dans Excel pour la comparaison des avantages ou inconvénients de chaque variante.

En outre, cet outil peut être combiné à ArcGIS pour traiter des données et représenter graphiquement les résultats.

### **3.3.4 Analyse Multicritères et méthode AHP (Analytic Hierachy Process)**

Selon l'OFROU (2006), la méthode d'analyse multicritères vise à évaluer un projet en réalisant un bilan des impacts qu'il génère dans les domaines économiques, sociaux, environnementaux ou autres, afin d'éclairer les décideurs dans le choix d'un parti d'aménagement. Une notation est donnée à chaque type d'impact, exprimant l'importance de celui-ci pour chacune des variantes étudiées. Les impacts peuvent être évalués, soit qualitativement, soit quantitativement, soit monétairement. Il n'y a donc pas systématiquement utilisation d'unité commune de mesure. Elle varie selon l'importance et les préférences que les évaluateurs accordent à chaque critère (écologique, économique, socio-politique). Un tableau des performances permet de visualiser l'ensemble des effets d'un projet, au besoin par la constitution d'un indicateur agrégé regroupant les critères et impacts pris en compte.

L'évaluation d'un projet demande un regard sur l'ensemble des critères du développement durable.

Pour l'aide à la décision, différents critères doivent être combinés. La méthode utilisée actuelle est « analyse multicritères » et « la superposition des cartes » (Li et al., 1999).

Pour ces méthodes, la « comparaison en paire » des enjeux (Chang et al., 2008; Svoray et al., 2005 ; Saaty, 1999) est nécessaire pour classer des résultats. Afin de réaliser des

synthèses de ces critères, les logiciels AutoCAD et ArcGIS sont utilisés (Rebolj and Sturm, 1999).

Des critères sociaux sont modélisés et pondérés dans le processus d'évaluation d'une variante de tracé (Piantanakulchai, 2003).

Selon (Piantanakulchai, 2003), un projet routier est évalué par la considération des objectifs et sous-objectifs comme illustré dans la Figure 1.8.

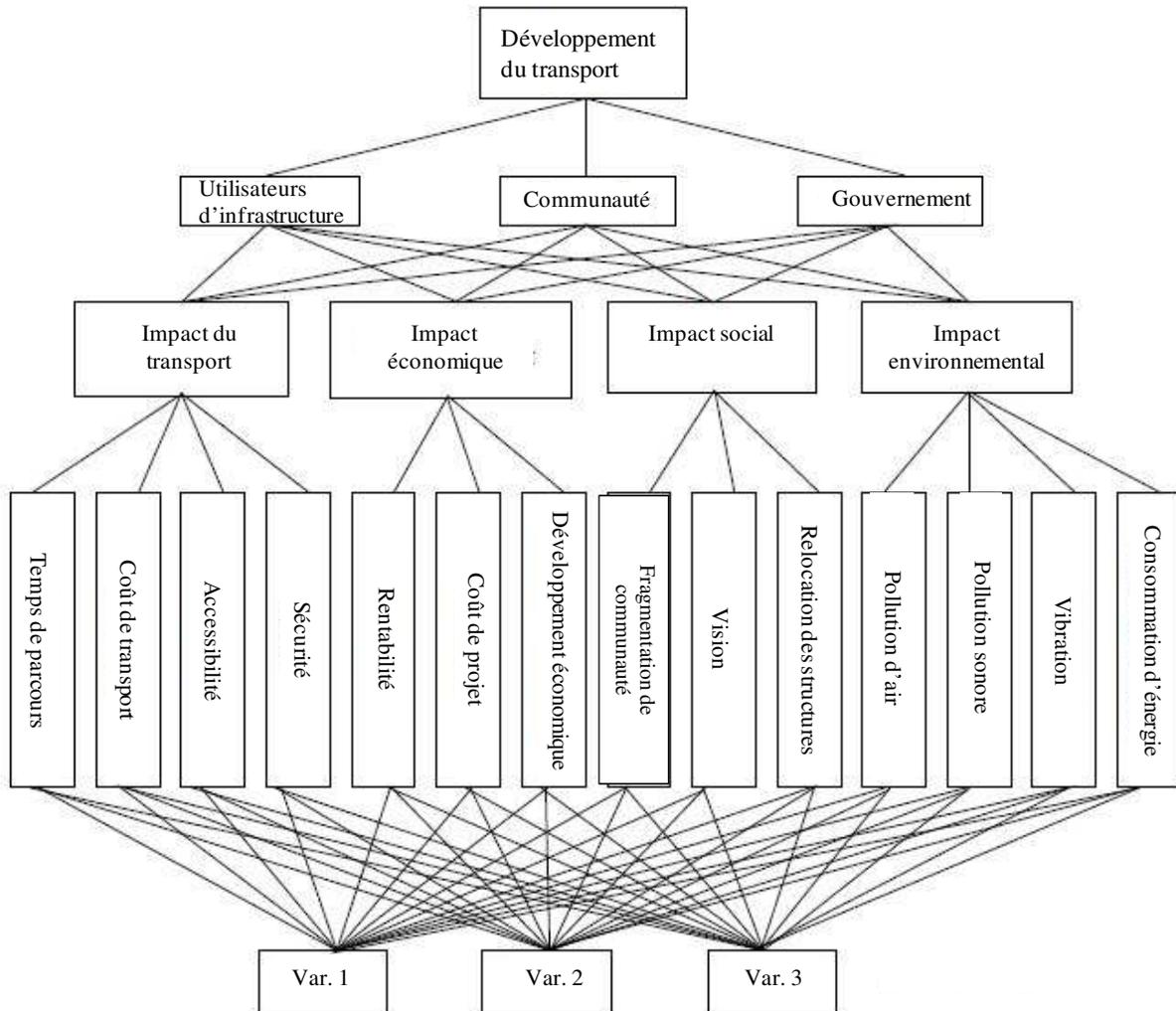


Figure 1.8 Objectifs et sous objectifs d'évaluation d'un projet routier (d'après Piantanakulchai, 2003).

### 3.3.5 Méthode d'évaluation utilisant ArcGIS

Le logiciel ArcGIS est souvent utilisé pour gérer des données topographiques quels que soient les objectifs. Le principe général de cette méthode consiste, après avoir collecté des données vectorielles caractéristiques des territoires, à établir des cartes de ces données, puis à les convertir en raster afin de pouvoir réaliser des opérations mathématiques avec elles.

Plusieurs auteurs ont montré les possibilités offertes par ArcGIS pour des applications dans les domaines de l'environnement, du social et économique, afin de représenter des caractéristiques des territoires. Dai et al. (2001), Yang et al. (2008), Chang et al. (2008) ont

construit des représentations cartographiques permettant de définir des plans d'utilisation des sols urbains. Les données utilisées étaient relatives à la topographie, aux risques géologiques, l'hydrogéologie, la gestion des déchets, la construction, la préservation des espaces naturels Phua et Miniowa (2005) ont effectué des calculs relatifs à la conservation des forêts et recherché des corridors pour faciliter le déplacement de la faune sauvage. Hossain et al. (2009) ont intégré la méthode d'analyse multicritères AHP dans ArcGIS afin d'identifier des zones de gestion durable de la ressource en eau intégrant durable des données sur la qualité des sols et de l'eau, ainsi que des données relatives à des facteurs socio-économiques.

Se basant sur les critères de distance et de temps d'accès à des lieux d'intérêt, ainsi que sur les prix des zones du territoire, Pior et Shimizu (2001) ont proposé une approche permettant d'estimer le bénéfice économique d'un projet routier pour le territoire traversé.

Pour la protection de l'environnement, en particulier des écosystèmes, Geneletti (2004) évalue des variantes de tracés en se basant sur les niveaux de fragmentation des écosystèmes pour le choix de la meilleure variante. La comparaison est quantitative et le résultat de calcul est présenté sur des cartes graphiques.

ArcGIS donne également la possibilité de combiner des impacts à l'étape d'exploitation de la route. Cela demande de modéliser ces impacts, (par exemple c'est le cas des sources d'émissions comme le de bruit, et de la pollution de l'air) par les logiciels métiers au préalable ou par des formules de calcul spécifiques, puis, à partir des résultats de ces calculs, on peut comparer des variantes de tracés comme le montrent Li et al. (1999).

L'évaluation d'un projet routier se base sur les objectifs principaux suivants : minimisation du coût de construction, maximisation de la fonction d'opération du réseau, minimisation de l'impact environnemental et optimisation de l'investissement économique. Par ces objectifs, on attribue des pondérations correspondantes aux besoins (Kalamaras et al., 2000). Les pondérations prennent en compte également des objectifs sur la biodiversité, conservation des sols et de l'eau, proximité à la route ou centre commerciale... (Phua et Miniowa, 2005). Des points de vue différents sont considérés pour chercher des variantes de tracés suivant des objectifs différents (Keshkamat et al., 2009)

Après avoir défini la carte d'impact total, ArcGIS est équipé d'une fonction basée sur l'algorithme Dijkstra pour la recherche des chemins de moindre impact (Snyder et al., 2008).

Enfin, les normes techniques doivent être prises en compte : vitesse de référence, minimum et maximum des pentes, rayons minimum et maximum, longueurs des éléments... Ces critères techniques sont intégrés dans ArcGIS car ils se basent sur les coordonnées X, Y, Z qu'ArcGIS peut gérer (Frank et al., 1994). Cependant, ces critères techniques restent encore difficiles à intégrer.

## **4 DÉMARCHE D'UTILISATION D'UN SIG POUR DÉVELOPPER UN OUTIL GRAPHIQUE D'ÉVALUATION DE L'INSERTION DES PROJETS**

### **4.1 Le choix d'ArcGIS pour effectuer l'évaluation dans la thèse**

D'après la littérature, différents auteurs utilisent ArcGIS comme un moyen de comparer des effets localisés dans des territoires. Le travail du bureau d'étude qui va être modélisé dans la thèse y compris en développant de nouveaux indicateurs se base sur le logiciel ArcGIS qu'on présente ci-dessous.

- ArcGIS stocke les informations sous la forme de couches thématiques pouvant être reliées les unes aux autres par la géographie.
- A partir du mode de représentation en Figure 1.9, un bilan est effectué *a priori* pour déterminer comment utiliser le logiciel ArcGIS.

La Figure 1.9 présente un exemple de la modélisation du territoire avec ArcGIS sous forme de couches « objet ».

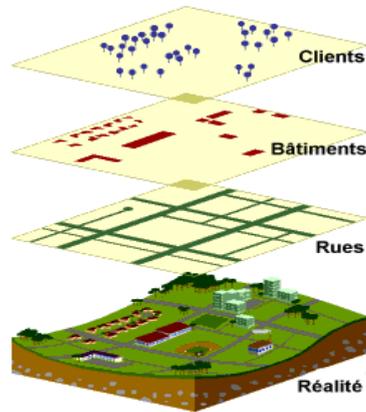


Figure 1.9 Modélisation du territoire avec ArcGIS (Taouss, 2009).

L'outil a la capacité de traiter (importation, conversion, représentation) de très nombreuses données des différents domaines étudiés pour chaque projet (milieu physique, milieu naturel, urbanisme, patrimoine, paysage). Un exemple est donné en Figure 1.10: on importe des données du projet et on les présente dans une carte graphique dans ArcGIS .

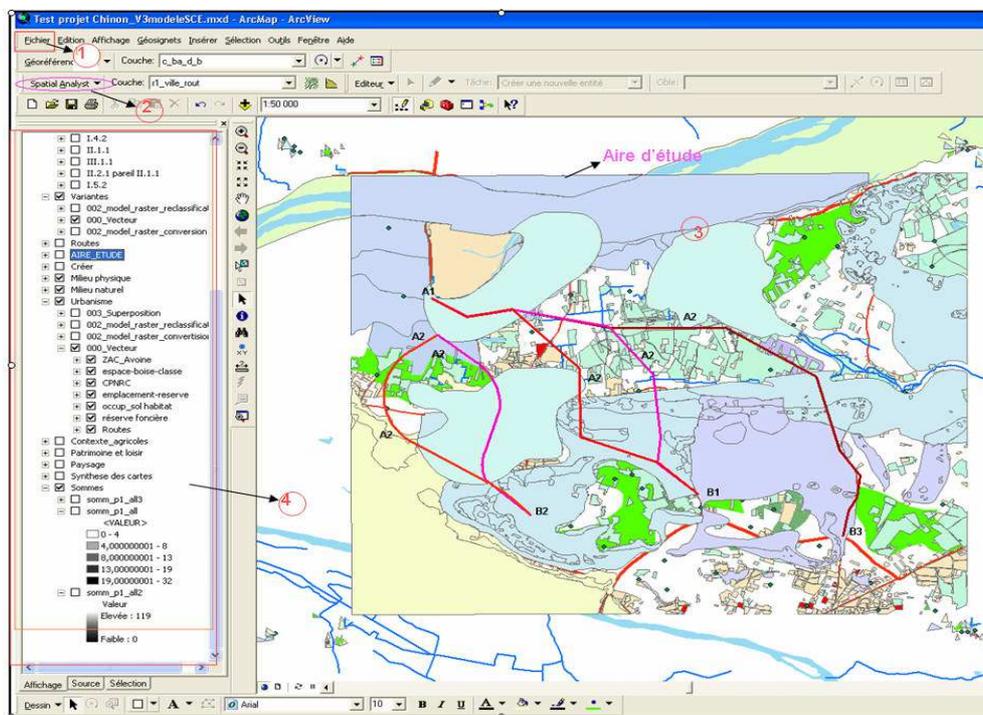


Figure 1.10 Illustre l'interface graphique dans ArcGIS (données, résultat)

Les données dans ArcGIS sont attachées à des vecteurs ou à des rasters comme illustré en Figure 1.11

#### **Données vecteurs**

L'ensemble des objets sont représentés à partir de points, lignes ou surfaces, définies en coordonnées réelles (X, Y, Z). Chaque ligne étant définie par une succession de points appelés vecteurs, chaque surface étant définie par les arcs qui tracent ses limites. Le terrain est représenté par des primitives graphiques (points, lignes, surfaces).

Ce type de donnée nécessite beaucoup moins de mémoire que les données rasters.

#### **Données rasters**

Le monde réel est représenté par une succession régulière de cellules, selon un maillage défini. A chaque cellule est associée une valeur donnée. Il s'adapte parfaitement à la représentation de données variables continues telles que la nature d'un sol.

Le modèle assure une meilleure compatibilité avec les données maillées telles que les images satellitaires numériques.

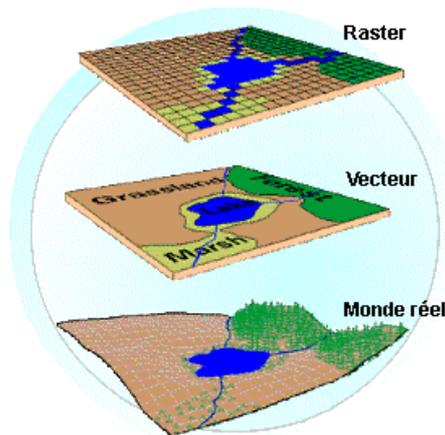


Figure 1.11 Types de données dans ArcGIS (Taouss, 2009).

Selon la nature de l'indicateur, les fonctionnalités d'ArcGIS utilisées seront donc reliées à des représentations en vecteur ou raster. En particulier les fonctionnalités de l'interface graphique du logiciel et les possibilités de calcul avec différentes fonctions d'une routine interne sont un des motifs du choix effectué.

Le schéma général de calcul avec ArcGIS est présenté en (Figure 1. 12). La programmation comprend deux étapes de calcul :

- calcul « manuel » : les données vecteurs (cartes sous forme de fichiers au format *Shape*) sont importées dans ArcGIS. Le traitement des données vecteurs consiste à délimiter (marque des 4 coins) le périmètre de la zone d'étude qui doit être commun à l'ensemble des cartes vecteur importées. Ceci est nécessaire à assurer le calage de l'ensemble des cartes à l'étape suivante.ans cela, la superposition des cartes rasters (étape suivante) ;
- calcul automatique : des modèles de calcul sont créés à partir du module Spatial Analyst afin de permettre la conversion des données vecteurs en données rasters. La fonction de reclassification permet de donner la valeur souhaitée à chaque fichier

raster. Cette possibilité peut être utilisée pour la pondération des enjeux afin de constituer des cartes de sensibilités par superposition de couches de données.

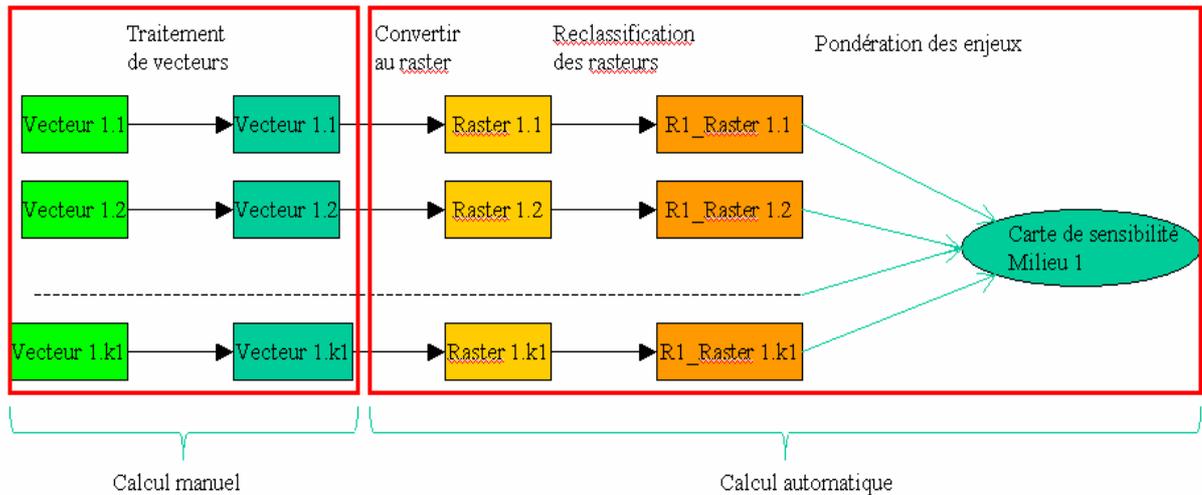


Figure 1. 12 Schéma de calcul avec ArcGIS.

Il s'agit d'effectuer un calcul avec des données d'entrée dont certaines sont sous forme cartographique spatialisée, et qui sont pour l'essentiel des données territoriales décrivant la zone d'étude. Le module de calcul Spatial Analyst (SA) (ce dernier est intégré dans ArcGIS) possède des fonctions de base qui permettent de calculer mathématiquement des indicateurs, de superposer des couches qui représentent graphiquement certains impacts.

Le calcul est programmé et mémorisé : en utilisant le Model Builder dans ArcGIS (Figure 1.13), on réalise un processus de calcul comme l'indique la Figure 1. 12. Grâce à ce schéma de calcul, les paramètres peuvent être associés à différentes valeurs. Ensuite, on peut sauvegarder le processus de calcul pour d'autres utilisations.

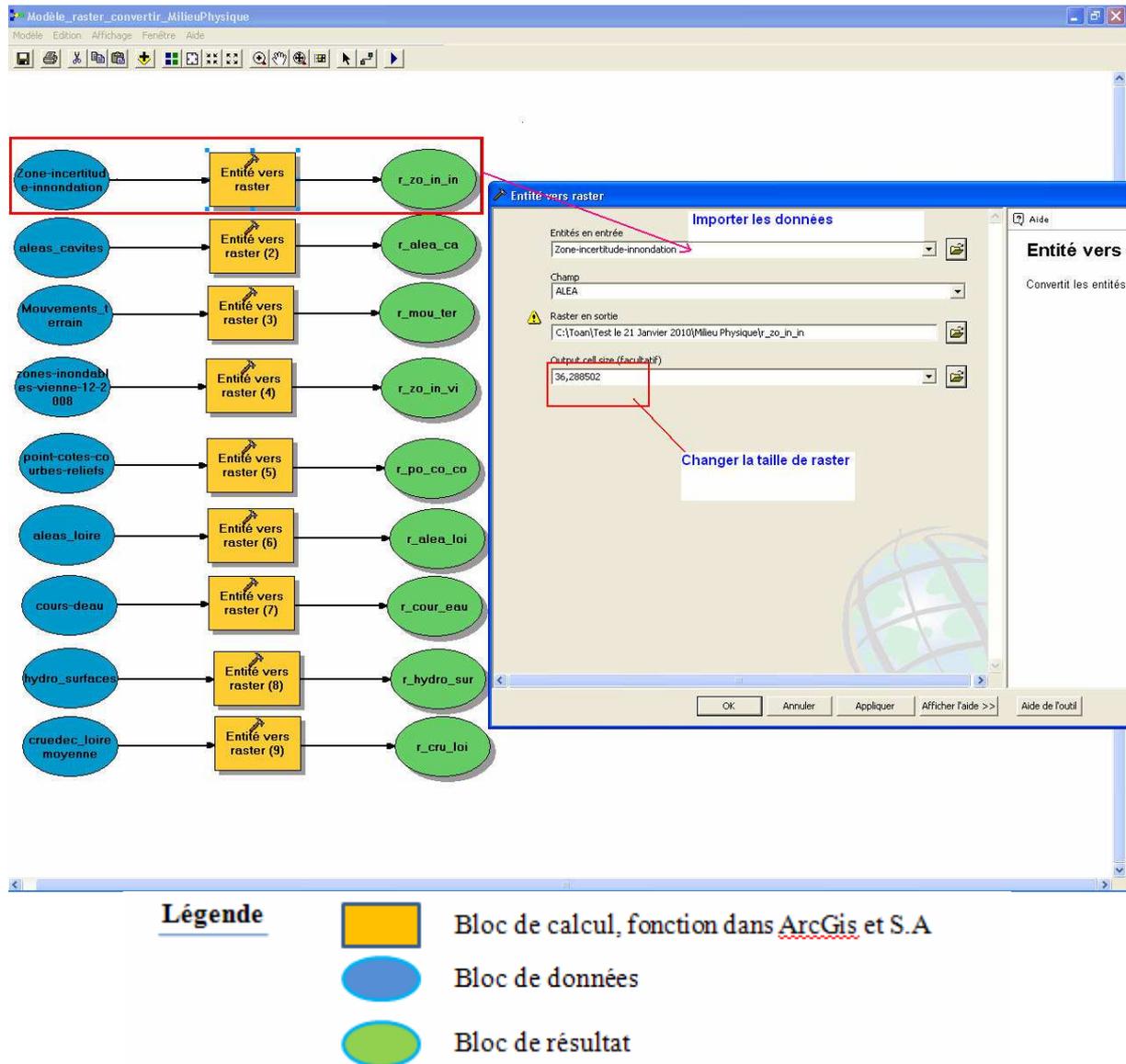


Figure 1.13 Routine de conversion des vecteurs en rasters.

## 4.2 Spécifications retenues pour l'outil

### 4.2.1 Réalisation des cartes thématiques et sensibilité

L'outil permet de prendre en compte tous les bases de données des différents thèmes : milieu physique, milieu naturel, milieu humain, patrimoine, paysage. A cette étape, l'outil convertit des données vecteurs à rasters et attribue des valeurs de sensibilité correspondantes qui remplacent les codes TF, F, M et Fa qui ne sont pas des grandeurs calculées. Pour chaque thématique, l'outil permet de la pondérer afin d'obtenir la carte de sensibilité thématique. La pondération des thématiques aboutit à la carte de sensibilité du territoire.

### 4.2.2 Recherche des fuseaux de sensibilité

En utilisant des fonctions dans le module Spatial Analyst, l'outil permet de chercher automatiquement des fuseaux qui passent dans les zones de moindre de sensibilité.

L'outil permet de sortir des « patates » (qui a valeur dans un intervalle [0 ; 0,2] par exemple). Ensuite, les experts réalisent des fuseaux de route en liant de ces « patates ».

#### **4.2.3 Insertion des tracés dans les fuseaux déterminés**

Les calculs pour la recherche des variantes sont réalisés sur la carte de sensibilité (ayant des valeurs de sensibilité différentes sur le territoire).

Le résultat de calcul est une variante la moindre de sensibilité (ayant la valeur de sensibilité totale minimale sur cette variante).

Grâce à l'outil, le temps de travail dans cette étape est réduit.

#### **4.2.4 Evaluation brute des impacts des tracés**

Il reste plusieurs critères sur lesquels l'évaluation des impacts est encore qualitative, ce que SCE souhaite améliorer en proposant de nouveaux indicateurs ; dans certains cas les critères et résultats de calcul sont présentés en chiffre. Autant que possible, SCE souhaite obtenir une représentation graphique.

Il existe des types des indicateurs différents : la méthode de calcul et de traitement de ces indicateurs sont différents. Pour cela, l'outil nécessite de prendre en compte des résultats de calcul des autres logiciels métiers comme (SoundPlan pour l'acoustique, Impact pour la pollution d'air, Ecorce pour les indicateurs ACV...).

Le résultat de calcul ou de traitement par l'outil doit être présenté sous forme de carte graphique.

#### **4.2.5 Evaluation des impacts après des mesures compensatoires**

On applique le même principe d'évaluation que précédemment afin de comparer quantitativement les indicateurs sélectionnés.

#### **4.2.6 Comparaison finale des variantes**

Après avoir obtenu des indicateurs d'impact des variantes, on importe ces résultats dans un tableau Excel. Ensuite, l'outil permet de convertir ces valeurs vers un intervalle [0 ; 1].

L'outil permet au client de mettre des pondérations sur les indicateurs pour la combinaison de toutes les thématiques afin de comparer des variantes. Il montre ensuite la meilleure variante de route.

## **5 DESCRIPTION DES CAS D'ÉTUDE DE PROJETS UTILISÉS DANS LA THÈSE**

L'entreprise SCE a mis à disposition des données de quatre projets routiers pour les besoins de la thèse. Ces projets numérotés pour des questions de confidentialité sont rapidement présentés ci-après avec les enjeux territoriaux qu'ils visent lorsqu'ils sont connus, et qui alimenteront ma démarche méthodologique.

Selon les configurations de desserte du territoire par le réseau routier local, l'aire d'étude est plutôt urbaine ou rurale, et par conséquent les cartes thématiques qui détaillent le

patrimoine construit et le réseau d'infrastructures sont plus ou moins denses. La création d'une nouvelle variante de tracé nécessite un raccordement au réseau préexistant de la nouvelle route et, au stade du projet et de notre méthode de calcul d'indicateurs, l'évaluation des différentes solutions à l'étude. De plus dans chaque territoire étudié, on peut considérer que les problématiques à traiter relèvent de deux volets :

- le territoire traversé qui comprend différents milieux naturels ;
- le patrimoine déjà construit qui comprend différents objets.

Dans les deux cas il s'agit d'éviter des zones déjà denses et donc de trouver des espaces disponibles sur le territoire. Il s'agit ensuite d'évaluer les impacts produits à la fois sur le territoire et sur le patrimoine et de comparer ces impacts. Leur nature peut être :

- globale, notamment les impacts environnementaux en lien avec l'analyse de cycle de vie ;
- locale, décrits dans ce cas par des indicateurs ponctuels ;
- linéique, car produits par la présence de l'infrastructure et la position qu'on considère le long de celle-ci ;
- surfacique, car en lien avec une aire de territoire qui serait par exemple artificialisée par le fait de passer la route ou vers laquelle on pourrait se rendre du fait d'un réseau de routes rendu plus dense.

Ensuite par rapport à la démarche d'évaluation proposée dans la thèse on retrouvera au moment de la comparaison des variantes avec l'outil SIG, la nécessité de décrire pour chaque variante la manière dont soit le territoire et le milieu considéré, soit le patrimoine et l'objet considéré, soit la géométrie de l'infrastructure elle-même (profil en plan, profil et travers) sont pris en compte pour effectuer le calcul d'indicateurs.

## **5.1 Projet N°1**

L'insertion de la nouvelle route dans l'aire d'étude a pour l'objectif d'améliorer un axe de développement du territoire et d'aménager une déviation locale pour réduire les nuisances notamment au sein du centre ville (zone A). Ce projet est donc une déviation d'un centre bourg (zone A). La nouvelle route doit permettre également d'améliorer le cadre de vie des riverains de la zone B.

Dans ce projet, on a toutes les données sur le milieu physique, le milieu naturel, la zone d'urbanisme, l'agriculture, les patrimoines et le paysage.

La Figure 1.14 présente l'aire d'étude du projet N°1.

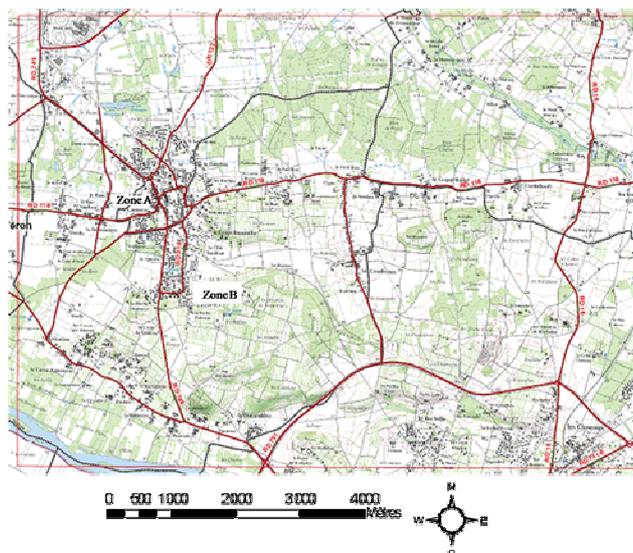


Figure 1.14 Aire d'étude du projet N°1.

La Figure 1.15 présente la carte de sensibilité du territoire et les variantes de tracés proposées par le bureau d'étude. Ces tracés permettent dans la suite de la thèse d'évaluer le processus automatique de calcul de tracé.

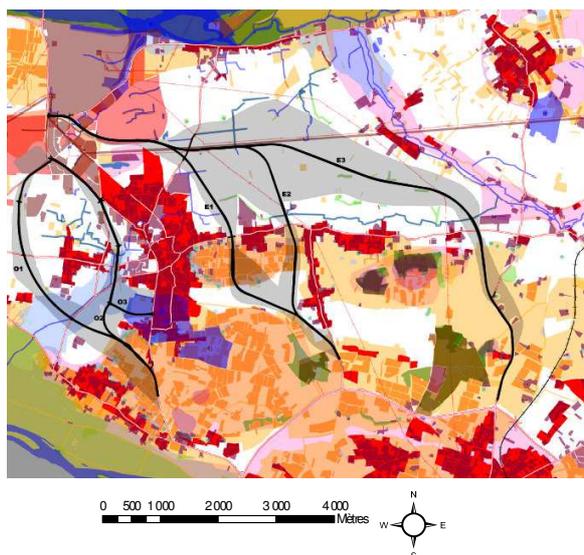


Figure 1.15 Variantes proposées par le bureau d'étude sur le projet N°1.

Les variantes de tracés ne partent pas obligatoirement depuis un point de départ unique et ne vont pas forcément au même point d'arrivée (connexion sur le réseau routier préexistant). Une variante est sélectionnée si elle satisfait des objectifs d'un projet routier. Par exemple : elle réduit le temps de parcours ou contribue au développement de l'économie locale ou régionale.

Le Tableau 1.5 récapitule les longueurs des variantes de tracé obtenues pour ce projet par le bureau d'étude. On peut constater que la longueur même des variantes induit une différence a priori dans ces tracés.

Tableau 1.5 Variantes de tracé

	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Variante 5
Longueur de la variante (m)	4 802	4 085	6 373	6 574	9 604

On travaille essentiellement sur ce projet routier car nous disposons de toutes les données nécessaires à l'évaluation du projet. En effet, l'utilisation des données de toutes thématiques permet de :

- réaliser des cartes de sensibilité thématique et des cartes de sensibilité totale du territoire ;
- comparer la carte de sensibilité trouvée dans la thèse et celle trouvée par le Bureau d'étude ;
- rechercher des variantes de tracés sur la carte de sensibilité et les comparer à celles trouvée par le bureau d'étude ;
- calculer la plupart des indicateurs (sauf la nuisance sonore) pour le choix de la meilleure variante.

## **5.2 Projet N°2**

La nouvelle route est une liaison entre 2 communes. Les objectifs de cette liaison sont les suivants :

- assurer un complément des itinéraires nationaux ;
- relier les pôles secondaires du territoire aux grands axes ;
- assurer une desserte plus fine du territoire départemental et des communes traversées ;
- favoriser un développement équilibré du territoire (objectif de maintien de l'emploi pour limiter les trajets domicile-travail) ;
- diminuer le trafic dans les bourgs et améliorer la sécurité ;
- créer une infrastructure performante en veillant à une bonne insertion du projet dans l'environnement.

La Figure 1.16 présente l'aire d'étude du projet N°2. Dans ce projet, on a toutes les données concernant le milieu physique, le milieu naturel, la zone d'urbanisme, l'agriculture, les patrimoines et le paysage.

Ce projet est utilisé pour simuler la carte de sensibilité du territoire.

La Figure 1.16 présente les variantes proposées du bureau d'étude sur le projet N°2. Dans la limite du temps, on ne réalise que la carte de sensibilité de ce projet. On ne fait pas une synthèse sur la carte de sensibilité, ni non plus de calcul des indicateurs pour la comparaison des variantes de tracés.

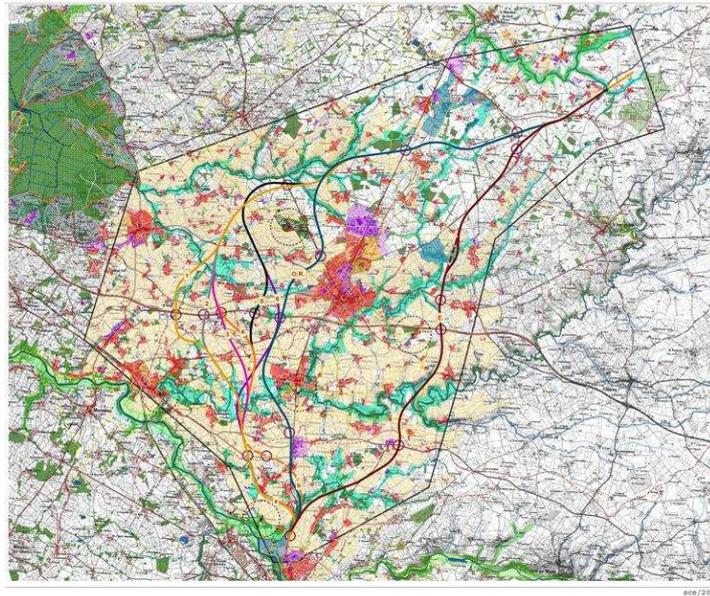


Figure 1.16 Variantes proposées par le bureau d'étude sur le projet N°2

### 5.3 Projet N°3

Ce projet a pour objectif de réduire la nuisance sonore d'une route en zone très urbanisée. Les données utilisées pour ce projet sont des bâtiments, des routes, le trafic. Dans ce projet, on a une seule possibilité de tracé à étudier en cherchant à limiter son impact sonore..

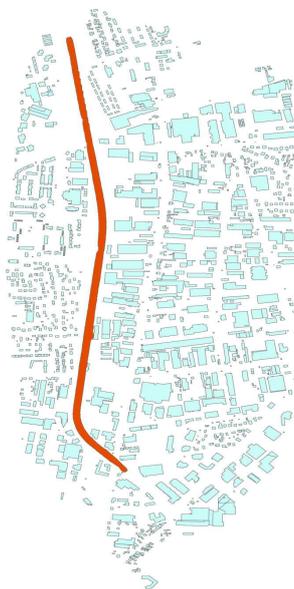


Figure 1.17 Variantes proposées par le bureau d'étude sur le projet N°3

## 5.4 Projet N°4

Les objectifs de ce projet sont de :

- rabattre les trafics de transit sur le réseau autoroutier ;
- améliorer les liaisons transversales au secteur et les échanges ;
- stabiliser le trafic ;
- réduire les nuisances pour les habitants ;
- assurer une meilleure desserte des équipements (activités, futur hôpital...).

Ce projet sera utilisé pour calculer la nuisance sonore pour 3 variantes de tracés. A partir du résultat obtenu, on pourra classer des variantes avec l'indicateur acoustique.

La Figure 1.18 présente l'aire d'étude comprenant 3 variantes de tracés et les zones d'habitation.

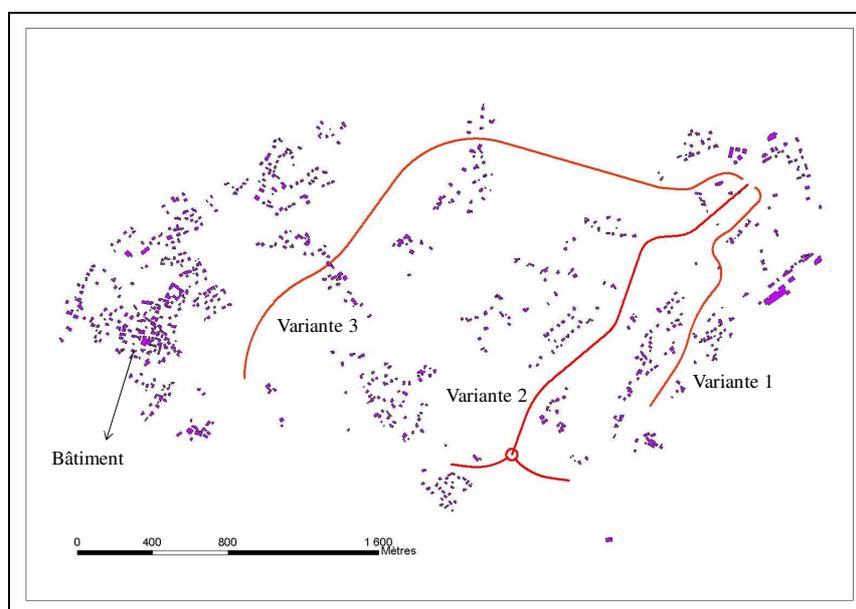


Figure 1.18 Variantes proposées par le bureau d'étude sur le projet N°4.

## 6 CONCLUSION

Ce chapitre a tout d'abord rappelé les pratiques métiers du bureau d'études au centre de ce travail de thèse. Le rôle et les interactions avec différents acteurs du projet routier ont été ensuite précisés. Le besoin de méthodes d'évaluation a été précisé puis un bilan succinct des méthodes d'évaluation disponibles a été proposé. La démarche de choix du logiciel ArcGIS afin de développer une méthode d'évaluation globale d'indicateurs liés à l'insertion des infrastructures routières dans un territoire est ensuite abordée.

Nous allons maintenant étudier un ensemble de projets types traités par SCE afin d'établir une méthode d'évaluation suffisamment large et de disposer d'au moins deux jeux de données par type d'impact à évaluer pour tester les données et la méthode de réalisation de la carte de sensibilité.

## **CHAPITRE 2**

### **CALCUL DES CARTES DE SENSIBILITÉ ET RECHERCHE DE VARIANTES DE TRACÉ**

## **1 INTRODUCTION**

Ce chapitre a pour objectif de présenter la méthode de réalisation d'une carte de sensibilité du territoire et de recherche des variantes de tracé traversant les zones de territoire de moindre sensibilité. La méthode est appliquée pour les projets N°1 et N°2 (cf chapitre 1). Le chapitre 2 se compose de plusieurs parties qui déroulent la recherche de tracés progressivement.

La première partie présente la modélisation effectuée avec ArcGIS des enjeux du territoire. Cette modélisation vise in fine : à identifier par le calcul et non par des notes les zones de moindre sensibilité du territoire et à automatiser la recherche de variantes. Le principe de réalisation de la carte de sensibilité du bureau d'étude telle que présentée au chapitre 1 sert ainsi de base au développement d'une méthode de calcul sous ArcGIS de la carte de sensibilité du territoire.

La seconde partie présente le résultat de calcul de carte de sensibilité du territoire par la méthode de superposition mathématique des cartes de données, afin d'obtenir une évaluation des zones de moindre sensibilité. Dans cette partie, on teste également plusieurs possibilités de calcul : le choix de différentes tailles de maille du territoire (maille de 100 m ; 50 m ; 25 m), ainsi que différents coefficients de pondération des thématiques les unes par rapport aux autres est discuté. En effet ces coefficients sont intéressants à mettre en œuvre dans le cadre d'un calcul car ils permettent de mettre l'accent sur certains thèmes qui selon le projet et le territoire seraient jugés plus importants par le bureau d'étude ou le client.

Enfin, dans la dernière partie, il s'agit de rechercher grâce aux fonctions mathématiques du logiciel ArcGIS qui sont programmées à cet effet au cours de la thèse, les tracés des variantes de routes dont la ligne moyenne traverse les zones de moindre sensibilité. Cette phase s'effectue grâce aux cartes de sensibilité trouvées et en lien avec la finesse des mailles. Une analyse des variantes identifiées à partir des différents maillages est présentée et discutée en les comparant aux variantes du bureau d'étude obtenues sur ce même projet.

## **2 MÉTHODE DE MODÉLISATION DES CARTES DE SENSIBILITÉ**

Une carte de sensibilité du territoire est créée à partir de plusieurs cartes thématiques comme précisé au chapitre 1. Chaque carte thématique est faite par la superposition des cartes d'enjeux avec ou sans pondération. Chaque enjeu se compose de différents niveaux de sensibilité : très fort, fort, moyen, faible qui sont évalués et classés par des experts (cf chapitre 1) mais auxquels on va attribuer une valeur chiffrée de 1 à 4. Les enjeux sont ensuite importés dans le logiciel ArcGIS comme des données d'entrée.

Le processus de réalisation d'une carte de sensibilité du territoire est le suivant :

- conversion des vecteurs en rasters ;
- attribution des valeurs de sensibilité (valeurs chiffrées) à chaque raster ;
- superposition des cartes de sensibilité des enjeux pour obtenir la carte thématique de sensibilité ;
- pondération des cartes thématiques de sensibilité pour obtenir la carte de sensibilité du territoire.

Le modèle de calcul développé est schématisé en Figure 2.1, il permet de :

- convertir des données externes de vecteurs en rasters avec les fonctionnalités classiques d’ArcGIS;
- re-classifier des rasters ;
- pondérer des thèmes (calcul par Spatial Analyst).

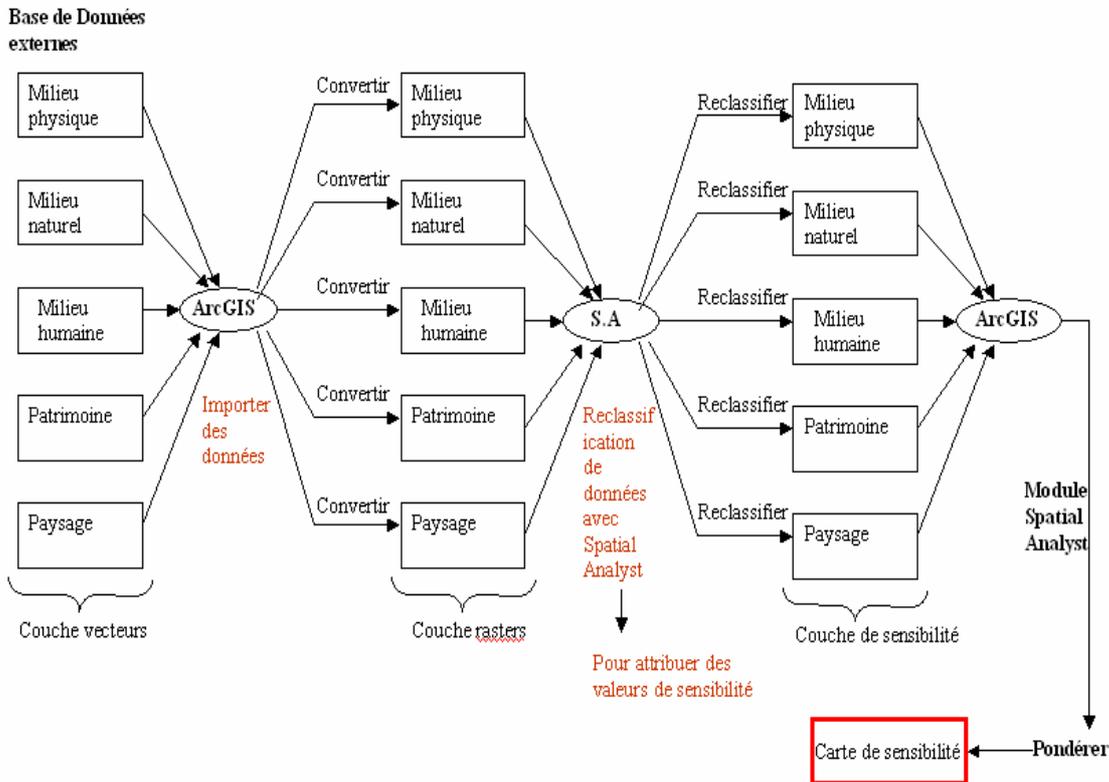


Figure 2.1 Modèle de calcul par l’outil basé ArcGIS.

## 2.1 Carte thématique - Principe de conversion de vecteurs en rasters selon le maillage choisi

A partir des couches vecteurs, les fichiers rasters sont créés grâce au module Spatial Analyst.

La Figure 2.2 a présente sous forme schématique et à titre d’exemple les données de l’enjeu « eau » (réseau hydrographique) sous forme vecteur. La Figure 2.2b présente le résultat de la conversion en raster de cet enjeu (si une partie du réseau passe dans la maille, la maille est cochée en quelque sorte ce qui est représenté par la lettre E sur la figure). En dépendant de l’échelle du projet, la taille de maille varie de quelques mètres à une centaine de mètres.

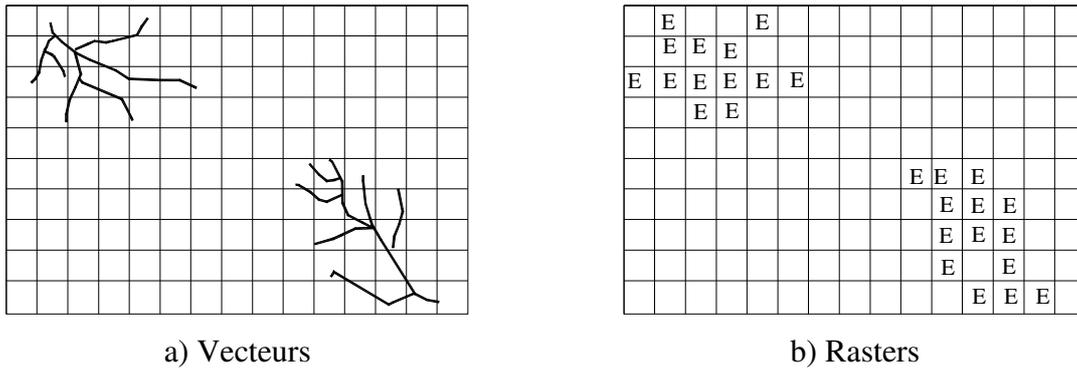


Figure 2.2 Enjeu « Eau » représentations..

La Figure 2.3a présente la donnée de l'enjeu « vignoble » sous forme vecteur. La Figure 2.3b présente le résultat de la conversion en raster de cet enjeu (si une partie du vignoble passe dans la maille, celle-ci est cochée ce qui est représenté par Vi en figure 2.3b).

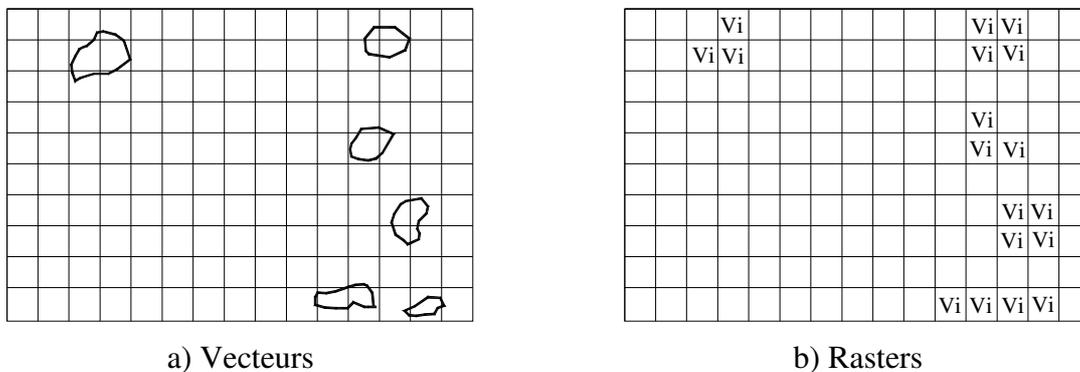


Figure 2.3 Enjeu « Vignoble » représentations.

La Figure 2.4a présente la donnée de l'enjeu « patrimoine » sous forme vecteur. La Figure 2.4b présente le résultat de la conversion en raster de cet enjeu (si une partie du patrimoine passe dans la maille, elle est également cochée, ici par la lettre P).

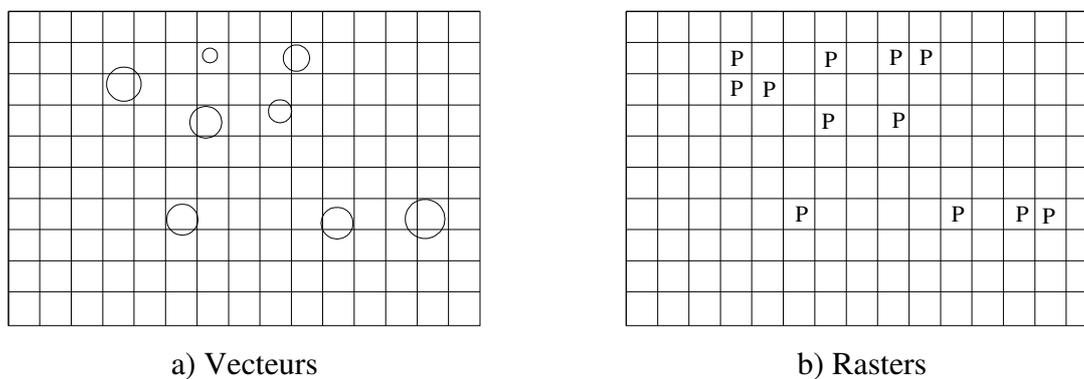


Figure 2.4 Enjeu « Patrimoine » représentations.

La Figure 2.5a présente la superposition des données ci-dessus sous forme vecteurs. La Figure 2.5b présente la capacité de superposition de ces mêmes données mais sous forme

de rasters ce schéma est une superposition des cases cochées des figures 2.2b, 2.3b et 2.4b. Ces rasters ont des valeurs si l'on attribue des valeurs pour chaque raster initial.

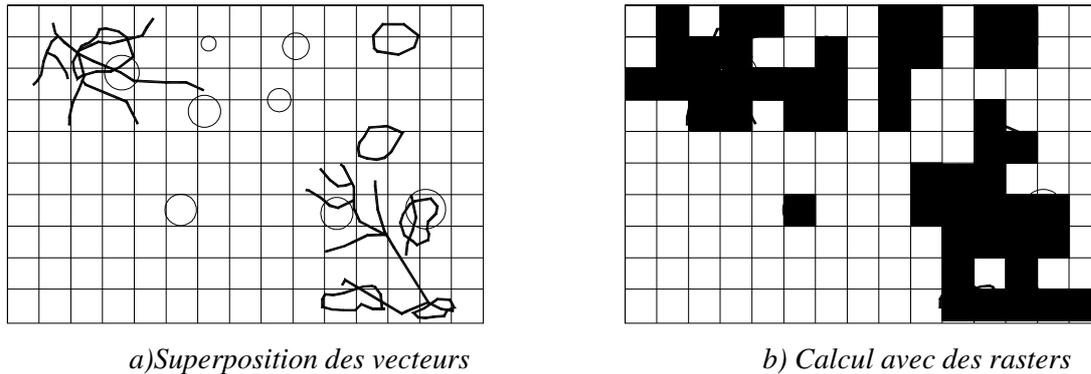


Figure 2.5 Superposition de 3 enjeux sur le territoire.

## 2.2 Attribution des valeurs de sensibilité chiffrée à chaque enjeu

Dans le but d'opérer des calculs pour quantifier les effets, on peut associer une valeur numérique à chaque niveau de sensibilité. On considère une première gamme de valeurs de sensibilité, plus ou moins contrastées (Tableau 2.1)

Tableau 2.1 Première gamme de valeurs de sensibilité.

Sensibilité Très Forte	$V_i^{tfo} = 4$
Sensibilité Forte	$V_i^{fo} = 3$
Sensibilité Moyenne	$V_i^m = 2$
Sensibilité Faible	$V_i^{fa} = 1$

L'indice « i » ici caractérise l'enjeu « i ». Les valeurs de sensibilité sont supposées sans dimension. Ici, les valeurs de sensibilité sont supposées d'associer des valeurs de 1 à 4 car ces valeurs permettent de représenter de différents niveaux de sensibilité.

La méthode d'attribution des sensibilités est illustrée ci-après à partir des données disponibles sur le projet N°1. Les tableaux 2.2 à 2.7 détaillent la liste des thématiques et eds enjeux retenus pour ce projet.

Le Tableau 2.2 présente les données sur le milieu physique. Pour le projet routier, la partie superficielle, de quelques mètres est concernée. Les données sont : alluvion, sénonien, turonien, cénomaniens, carrière, cave, ouvrage civil, topographie, zones inondables, usage de l'eau... Chaque type de donnée est évaluée avec des chiffres (1 ; 2 ; 3 ; 4), la correspondance habituelle avec les couleurs étant conservée suivant des niveaux de sensibilité (très fort, fort, moyen, faible) avec des gammes de couleur (foncé, clair,...).

Tableau 2.2 Données sur le milieu physique.

Domaines	Type "Carte"	Détail "Carte"	Sensibilité
1a. Géologie	1.1 Alluvion 1.2 Sénonien 1.3 Turonien 1.4 Cénomanién 1.5 Carrière		4
			3
			4
			2
			4
			1
			4
			4
			3
1c. Mouvement de terrain			4
2a. Relief 2.b Réseau hydrographique, hydrologie	2.1 Topographie 2.2 Zones inondables 2.3 Usage de l'eau	Captage ou forage Périmètre de protection rapproché	2
			4
			1
			3

Le Tableau 2.3 détaille les données sur le milieu naturel.

Tableau 2.3 Données sur le milieu naturel.

Domaines	Type "Carte"	Détail "Carte"	Sensibilité
1. Habitat naturel		Cave Moulin cavier Boisement Chenai Thermophile Cultures, vigne Formation herbacée??? Fourrés medio européens sur sol fertile?? Landes Pelouses Plantation de Pin Prairie mésophile de fauche Zone fortement anthropisée	4
			4
			2
			4
			4
			1
			4
			4
			1
			4
			2
			4
			3
2. Faune	Avifaune Reptile Amphibien Mammifère		3
			3
			1
			3

Le Tableau 2.4 détaille les données sur le contexte agricole.

Tableau 2.4 Données sur le contexte agricole.

Domaines	Type "Carte"	Détail "Carte"	Sensibilité
2. Contexte Agricole	Vignoble	Périmètre AOC Vigne Centre viti-vinicole	4
			3
			4
	Sylviculture	Boisement Peupleraie	1
			4
	Agriculture	Activité existante maraichage, horticulture Réseau de chaleur CNPE???? Verger, pépinière, plantation truffière Secteur de pâtures hors vallée	4
			2
			4
			3
			4
	Aménagement foncier	Périmètre en cours d'étude	4

Le Tableau 2.5 détaille les données sur le milieu humain et l'urbanisme.

Tableau 2.5 Données sur le milieu humain, urbanisme.

Domaines	Type "Carte"	Détail "Carte"	Sensibilité
1. Urbanisme	Habitat, activités, équipements	- Zone urbaine, hameau, habitat isolé et dépendances - Equipement: sport, loisirs, santé, cimetière - Equipement: école, collège, centre de formation - Autre bâti isolé, aire gens du voyage, dépôt	4 4 3 4
	Vocation des espaces non urbanisés	- Zone d'activités activité isolée, - Zone d'habitat à court ou moyen terme - Equipement public urbain à court, moyen ou long terme - Extension à long terme des activités - Réserve foncière publique pour déviation routière	2 4 3 4 1
3. Foncier	Propriétés de collectivités Propriétés liés à l'activité CNPE	Etat, département, commune Société des agents nucléaires français Office public d'aménagement et de construction d'immeuble	3 4 3
	Propriétés conservatoire du patrimoine	Conservation du patrimoine naturel de la région	4
4. Infrastructures, risques et servitudes	Risque nucléaire	Central nucléaire Cercle de 5km de rayon Plan particulier d'Intervention ICPE en activité	4 2 4
	Risque technologie		4
	Réseau électrique de transport	Poste de transformation	1
	Réseau de transport de gaz	Ligne Canalisation souterraine	4 2
	Servitudes radioélectriques	Poste de détente	4
	Réseau routier	Liasion hertzienne - Structurant, secondaire, axe de desserte bus, pont, passage en dénivelé	3 4 4
	Réseau ferroviaire	- Voie ferrée desserte - Ancienne voie ferrée - Servitude ferroviaire	4 4 2
	Classement sonore des routes et voies ferrées Risque feux de forêt		4 3
5. Trafic		4	
6. Accidentologie		- Bilan: au moins un tué	4
		- Bilan: au moins un blessé hospitalisé	3
		- Bilan: au moins un blessé non hospitalisé	2

Le Tableau 2.6 détaille les données sur le patrimoine.

Tableau 2.6 Données sur le patrimoine.

Domaines	Type "Carte"	Détail "Carte"	Sensibilité
1. Patrimoine, loisir, tourisme	1. Patrimoine culturel	- Site inscrit	4
		- Périmètre de protection Monument Historique classé ou inscrit	2
		- Autre édifice remarquable (château, église, demeure..)	3
		- Elément de petit patrimoine (moulin, lavoir...), troglodyte	4
		- Site ou indice de site archéologique connu	3
		- Voie romaine	2
		- Périmètre révision et extension ZPPAUP	3
	2. Circulation douces	-Circuit à vélo	3
		- Circuit de promenade et de randonnée pédestre	3
		- Axe cyclable projeté	4
	3. Accueil de public - Loisirs et tourisme	- Plein air: aire de repos, parcours de santé, moto-cross	1
		- Centre équestre	4
		- Lieu de visite: château, écomusée, maison des vins	3
		- Grand équipement communautaire	4
		- Hébergement touristique: gîte, chambre d'hôte	2
		- Autre restaurant	3
	4. Espaces naturels sensibles	- Zone de préemption	3
		- Acquisition	3

Le Tableau 2.7 présente els données sur le paysage.

Tableau 2.7 Données sur le paysage.

Domaines	Type "Carte"	Détail "Carte"	Sensibilité
2. Contexte paysage	Zones batiées	- Habitat, équipement	3
		- Activités	4
	Entités paysagère et visions	- Vallée remarquables, bocagères ou boisées	2
		- Ilot industriel monument	4
		- Paysage intra-rocade	3
		- Ligne de crête du plateau crayeux	4

L'ensemble de ces tableaux montrent une forte variation des niveaux de sensibilité selon les enjeux considérés pour ce projet.

## 2.3 Superposition des enjeux dans une thématique

On simule ci-après le travail du bureau d'étude. Le territoire étant composé de plusieurs thématiques, chaque thématique se composant de plusieurs enjeux différents, on superpose les cartes de sensibilité de chaque enjeu en additionnant les valeurs chiffrées de sensibilité (tableaux précédents) afin de réaliser des cartes de sensibilité thématique du territoire traversé,. Pour chaque carte de sensibilité thématique on a :

$$Sensibilité\ thématique = \sum_{i=1}^{Ne} (Sensibilité\ de\ l'enjeu\ «\ i\ ») \quad (Eq.\ 2.\ 1)$$

Avec Ne : nombre d'enjeux de la thématique.

## 2.4 Pondération des cartes thématiques et superposition des cartes

Les cartes thématiques sont superposées par la fonction mathématique « addition » avec multiplication possible de chaque carte par un coefficient de pondération ki..

L'importance de chaque thématique est prise en compte en multipliant et pondérant les valeurs de sensibilité correspondantes des milieux physique, milieu naturel, urbanisme, agricole, patrimoine, paysage par des coefficients  $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$  respectivement.

Pour l'exemple du projet N°1 considéré (tableaux 2.2 à 2.7), la sensibilité du territoire dans l'aire d'étude (STe) est fournie par l'équation :

$$S_{Te} = k_1 \times S_{ph} + k_2 \times S_{na} + k_3 \times S_{ur} + k_4 \times S_{ag} + k_5 \times S_{pat} + k_6 \times S_{pay} \quad (Eq. 2. 2)$$

avec  $S_{ph}$  : sensibilité du milieu physique ;  $S_{na}$  : sensibilité du milieu naturel ;  $S_{ag}$  : sensibilité d'agricole ;  $S_{pat}$  : sensibilité du patrimoine et  $S_{pay}$  : sensibilité du paysagé.

Pour analyser l'influence des coefficients, on réalisera par la suite des tests comme suit :

1<sup>er</sup> cas :  $k_i = 1$  pour toutes les thématiques.

Dans ce cas, l'importance de toutes les thématiques est égale.

2<sup>e</sup> cas : valeurs  $k_i$  sont différentes

Si l'on considère que l'importance du patrimoine est la plus grande, devant celle du milieu naturel, on peut attribuer des valeurs  $k_2 = 3$  ;  $k_3 = 2$  ;  $k_5 = 4$  ;  $k_1 = k_4 = k_6 = 1$  pour chaque carte de sensibilité thématique.

## 2.5 Recherche des variantes de moindre sensibilité sur la carte de sensibilité

En utilisant la fonction « chemin de coût » du module Spatial Analyst, on identifie les chemins de moindre sensibilité qui relient les points de départ et d'arrivée du projet en empruntant le chemin qui traverse les mailles de valeurs faibles sur la carte de sensibilité du territoire. Les points de départ et d'arrivée du projet peuvent être uniques (origine et destination précis) ou multiples comme par exemple dans le cas d'étude N°1 où il s'agit de rejoindre une section de route préexistante (sud de l'aire d'étude). Ce dernier cas de figure multiplie les possibilités de variantes de tracé.

## 2.6 Test de sensibilité des paramètres du modèle du territoire

Ces tests ont pour objectif d'examiner la modification des cartes de sensibilité, des variantes obtenus selon des paramètres :

- Finesse de maillage : des mailles plus fines permettent d'obtenir une meilleure définition des différentes zones du territoire mais induisent plus de traitement d'information (plus de mailles) donc plus de temps de traitement. A un certain seuil de finesse du maillage il est probable que la définition des zones et des variantes de tracé de moindre sensibilité ne varie plus que de façon marginale. De ce point de vue il est donc important d'optimiser le maillage de l'aire d'étude.
- Facteurs de pondération des thématiques : les pondérations des cartes de sensibilité thématiques sont le reflet de la perception de l'environnement du projet par l'ensemble des acteurs. Des cartes thématiques peuvent avoir une influence sur des parties du territoire plus ou moins étendues. On conçoit dès lors que l'importance

allouée à ces couches, ainsi que leur superposition, puisse avoir une répercussion sur la carte de sensibilité finale. Un choix de variante sera donc d'autant plus robuste qu'il sera peut sensible aux variations de facteurs de pondération.

### **3 VALIDATION DE LA MÉTHODE D'ÉVALUATION DE LA SENSIBILITÉ DU TERRITOIRE**

Dans cette partie, le calcul des cartes thématiques permet de réaliser une carte de sensibilité totale du territoire pour rechercher des variantes de tracé qui traversent des zones de moindre sensibilité. On s'intéresse notamment aux paramètres de maillage et à son influence sur les résultats.

#### **3.1 Réalisation de la carte de sensibilité par addition des cartes thématiques et remplacement des niveaux de couleur par des valeurs de sensibilité**

Pour deux des projets, des premiers tests des modèles d'évaluation de la sensibilité du territoire sont effectués avec hypothèse de calcul suivant :

- maille de 25 m pour le projet N°1 maille de 100 m pour le projet N°2 ;
- conversion de la sensibilité dans l'intervalle [1 ; 4] pour chaque enjeu selon la méthode décrite au début de ce chapitre ;
- superposition pour chaque milieu de plusieurs enjeux avec une pondération de 1 ;
- superposition des cartes pour tous les thématiques avec une pondération de chaque thématique de 1.

##### **3.1.1 Application au projet N°1**

Tout d'abord, les cartes de sensibilité thématiques sont calculées comme présenté en annexe. Ensuite, on pondère ces cartes pour obtenir la carte de sensibilité du territoire.

La mise en œuvre du modèle de pondération des cartes thématiques est réalisé dans ArcGIS afin d'obtenir la carte de sensibilité du territoire. La Figure 2.6 présente ce modèle qui intègre les cartes de sensibilité thématiques (ovales à gauche), la fonction de pondération (rectangle au centre), le résultat de la carte de sensibilité du territoire (ovale à droite).

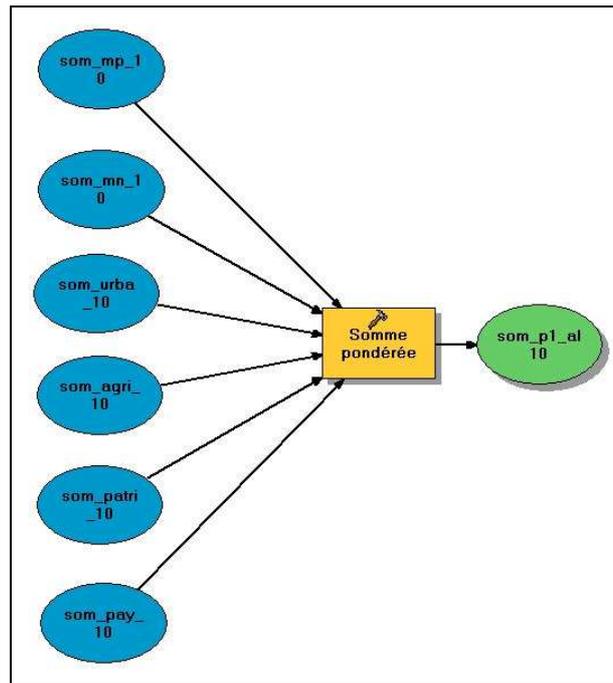


Figure 2.6 Le modèle de pondération des cartes thématiques.

La Figure 2.7 permet de comparer les cartes de sensibilités obtenues par le calcul à celles tracées avec uniquement les codes couleur. La Figure 2.7b montre la carte de sensibilité du territoire obtenue selon le modèle présenté en Figure 2.6 avec la maille de calcul = 25 m en superposant les 6 cartes de sensibilité précédentes.

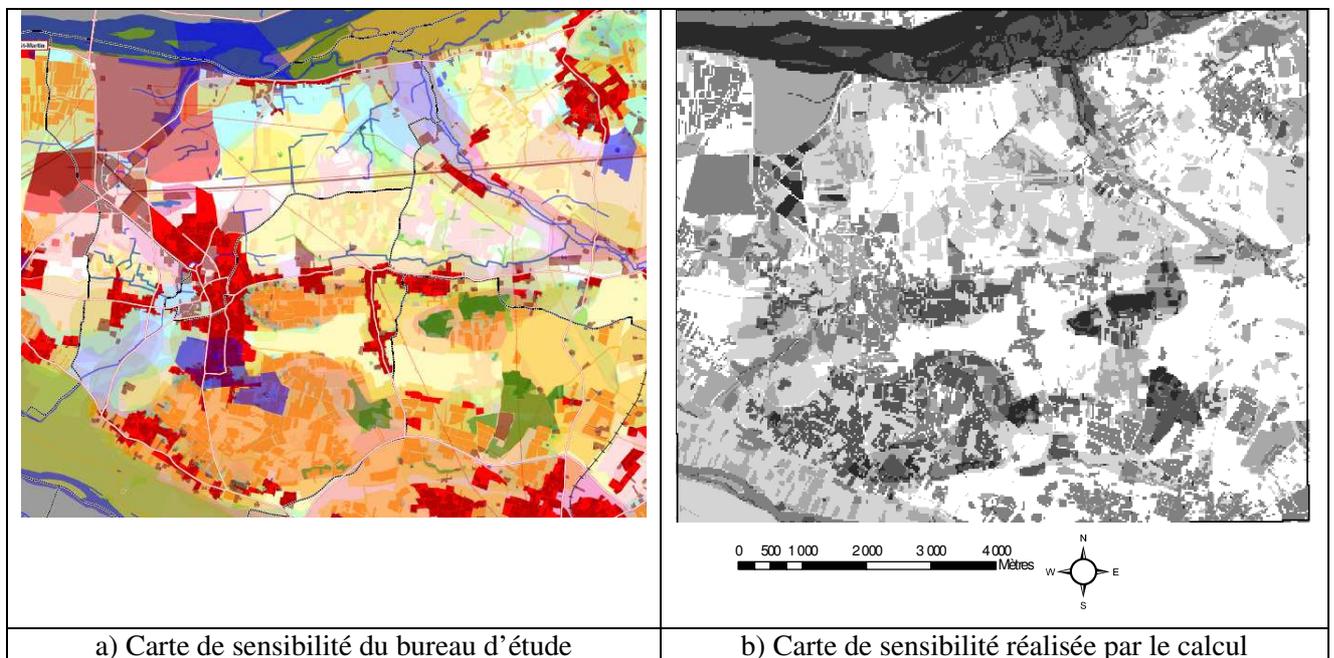


Figure 2.7 Validation de la méthode de calcul des cartes de sensibilité du territoire

Afin de faciliter la comparaison, la carte de sensibilité réalisée par le bureau d'étude est représentée ci-dessous dans la Figure 2.8a en nuances de gris, comme la carte calculée (Figure 2.7b). On observe que la carte calculée aboutit à une représentation du territoire assez semblable à la carte originale, hormis trois zones dans lesquelles le calcul indique un degré de

sensibilité inférieur à l'original (zones cerclées de rouge sur la Figure 2.8b), et une zone dans laquelle il indique une sensibilité supérieure (zone cerclée de bleu).

Les zones cerclées de rouge correspondent aux secteurs dans lesquels l'urbanisation et les activités socio-économiques (zones industrielles, de service, de loisirs) sont particulièrement importantes (Figure 2.7a). Sur la carte originale de sensibilité du bureau d'étude, ces données sur le milieu humain et l'urbanisme sont représentées en couleur rouge (voir Section 2). Or la conversion en niveau de gris des zones rouges produit des zones plus foncées que les autres (notamment des zones bleues ou vertes). La zone cerclée de bleu correspond aux activités agricoles, sylvicoles et viticoles (Figure 2.7a).



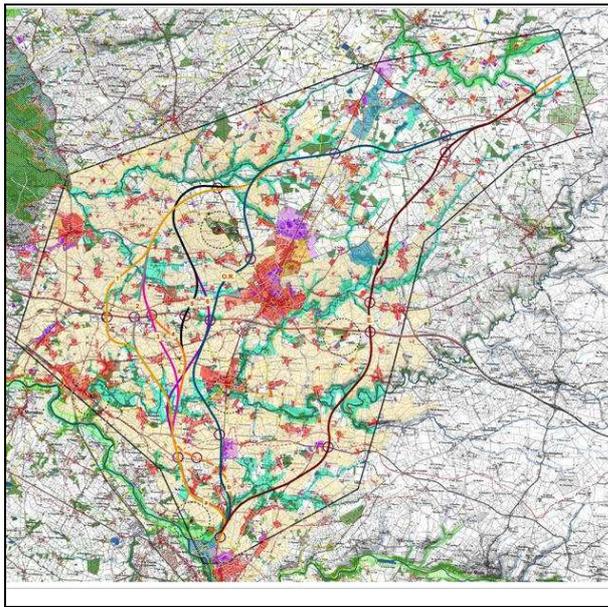
Figure 2.8 Comparaison des cartes de sensibilité.

La méthode ArcGIS de calcul de carte obtenue permet de plus de pondérer des thématiques. Cela permet donc de prendre en compte des avis des acteurs dans la réalisation des cartes de sensibilité du territoire. La carte de sensibilité obtenue par le calcul distingue mieux les zones de sensibilité par rapport à celle du projet du bureau d'étude.

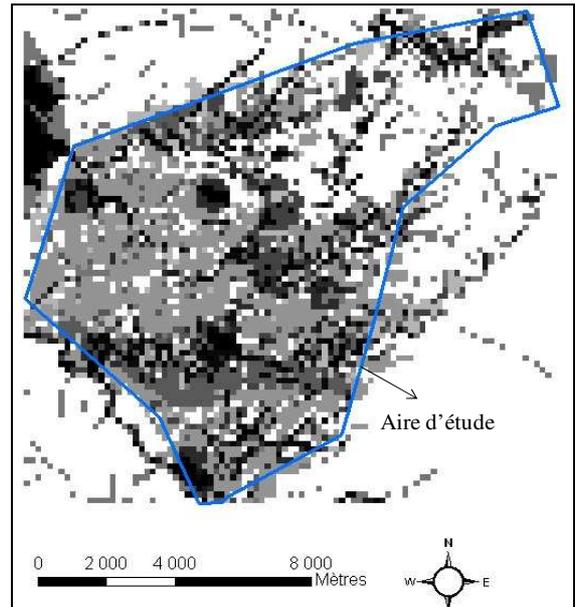
### 3.1.2 Application au projet N°2

Afin de vérifier la méthode de calcul des cartes de sensibilité, on applique aussi cette méthode au projet N°2 et on compare le résultat à celui obtenu par le bureau d'étude de la même manière que pour le projet N°1.

La Figure 2.9a présente la carte de sensibilité obtenue par le bureau d'étude. D'une façon similaire à la méthode présentée pour le projet N°1, on calcule la carte de sensibilité du projet N°2. La Figure 2.9b présente la carte de sensibilité calculée pour le projet N°2, avec une maille de 100 m.



a) Carte de sensibilité réalisée par le bureau d'étude



b) Carte de sensibilité réalisée par le calcul

Figure 2.9 Carte de sensibilité du territoire du projet N°2.

On trouve que la carte de sensibilité calculée du projet N°2 montre bien l'état du territoire particulièrement les zones sensibles, et les zones de moindre sensibilité par rapport à la carte réalisée par le bureau d'étude.

Pour finir, la carte de sensibilité obtenue par le calcul distingue mieux les zones de sensibilité par rapport à celle du projet du bureau d'étude.

Les calculs de la carte de sensibilité du projet N°1 et du projet N°2 donnent une confiance sur la méthode de calcul de la carte de sensibilité.

Dans la limite du temps de la thèse, on ne réalisera en fin de chapitre que des analyses sur la carte de sensibilité, la recherche des variantes et le calcul des indicateurs pour le projet N°1.

### 3.2 Réalisation de la carte de sensibilité par la conversion des cartes de sensibilité thématique dans l'intervalle [0 ; 1]

La partie précédente (3.1) a permis d'obtenir des cartes thématiques de sensibilité mais les valeurs de sensibilité de chaque carte dépendent du niveau de sensibilité de chaque enjeu et également du nombre d'enjeux. En effet, une carte thématique peut avoir de grandes valeurs de sensibilité s'il y a plusieurs enjeux en un même endroit. Si l'on superpose des cartes thématiques, on peut voir des cas où la sensibilité maximale du milieu physique est grande (= 9 par exemple), mais celle du milieu naturel est plus faible (= 6 par exemple) et ainsi pondérer en quelque sorte des thématiques mais sans le souhaiter. Toutefois, on ne peut pas a priori accepter l'hypothèse que le milieu physique dans ce projet est plus important que le milieu naturel. Pour cette raison, chaque carte thématique doit être convertie à une carte de valeur homogène [0 ; 1] afin de ne pas introduire de biais. Cela est réalisé en divisant toutes les valeurs de cette carte par la valeur de sensibilité maximale. On obtient alors 6 nouvelles cartes de sensibilité thématiques.

Pour un projet, des tests des modèles d'évaluation de la sensibilité du territoire sont effectués avec les hypothèses de calcul suivant :

- maille 25 m ;
- conversion de la sensibilité dans l'intervalle [1 ; 4] pour chaque enjeu ;
- superposition pour chaque milieu de plusieurs enjeux avec une pondération de 1 ;
- conversion de chaque carte thématique dans l'intervalle [0 ; 1] ;
- superposition des cartes pour tous les thématiques avec une pondération de chaque thématique de 1.

Le modèle de pondération des cartes thématiques de conversion est réalisé. La Figure 2.10b présente la carte de sensibilité du territoire obtenue. On trouve qu'avec la conversion en [0 ;1] de chaque carte de sensibilité thématique, les zones de sensibilités du territoire changent la position.

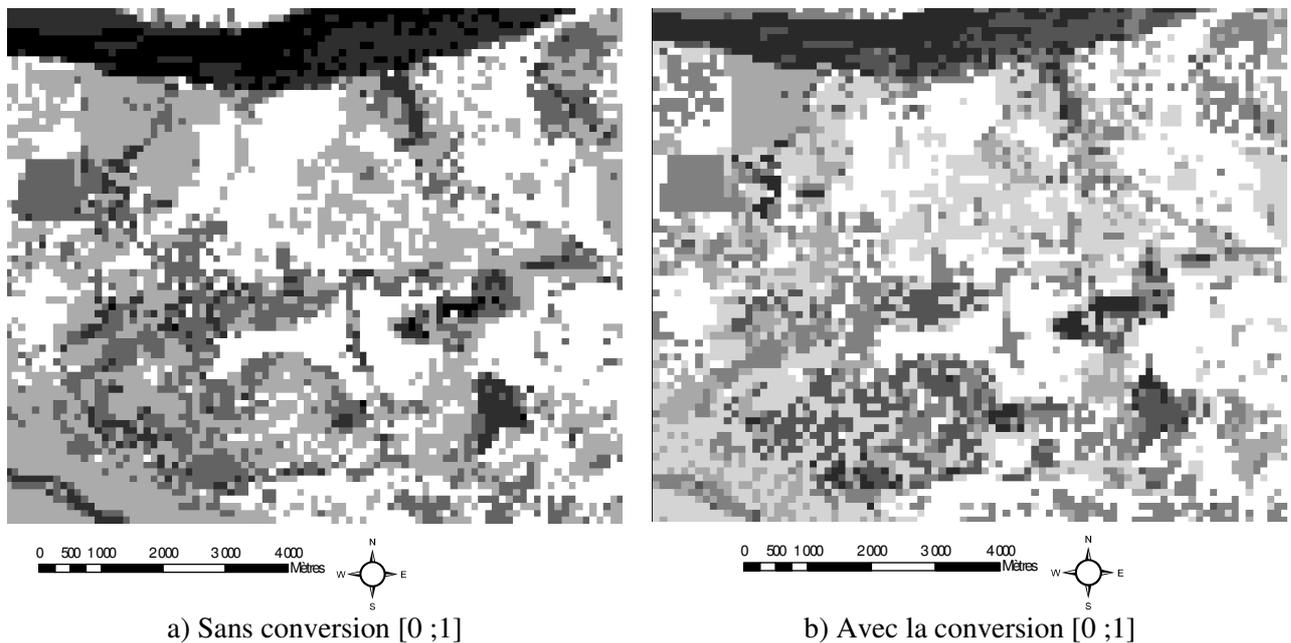


Figure 2.10 Carte de sensibilité du territoire du projet N°1

Les thématiques comprennent un nombre différent d'enjeux. La superposition de différentes thématiques doit donc être réalisée de sorte à éviter une distorsion de leur importance respective (surreprésentation des thématiques décrites par de nombreux enjeux par rapport à celles décrites par moins d'enjeux). Ainsi, avant superposition, chaque carte thématique, quel que soit le nombre d'enjeux servant à la décrire, est convertie en valeurs comprises entre 0 et 1. Cela signifie que toutes les valeurs de chaque thématique sont réduites (divisées) par la plus grande valeur calculée pour cette thématique. Dans la suite, les calculs prennent en compte ce traitement.

Dorénavant, lorsqu'on utilisera l'expression « carte [0 ; 1] », on sous-entendra que toutes les cartes thématiques de sensibilité auront été converties dans l'intervalle [0 ; 1] avant de les pondérer pour obtenir la carte de sensibilité totale du territoire.

### 3.3 Analyse de l'effet des tailles de mailles

#### 3.3.1 Choix de la taille de maille selon la largeur de chaussée

Chaque type de projet de route et chaque aire d'étude demande une précision différente dans le calcul de la carte de sensibilité. Cela dépend de l'échelle de l'aire d'étude et de la classe de la route. En effet, la largeur de la route dépend de la classe de la route. Une route importante comme une autoroute ou une route nationale a une grande largeur. La taille de maille de calcul est grande dans ce cas (maille = 100 m car la largeur d'une autoroute est grande >20 m et son emprise est également grande). Pour les routes départementales ou communales, cette largeur est plus petite. La taille de maille de calcul prend donc une valeur de 50 m ou de 25 m. On analyse ci-dessous des cas de calcul avec des différentes mailles.

Pour le projet N°1, des tests du modèle d'évaluation de la sensibilité du territoire sont effectués avec les hypothèses de calcul suivantes pour chaque taille de maille :

- conversion de la sensibilité dans l'intervalle [1 ; 4] pour chaque enjeu ;
- superposition pour chaque milieu de plusieurs enjeux avec une pondération de 1 ;
- conversion chaque carte thématique dans l'intervalle [0 ; 1] ;
- superposition des cartes pour tous les thématiques avec une pondération de chaque thématique de 1.

#### 3.3.2 Résultats projet N°1 - maille de 100 m

La Figure 2.11 présente la carte de sensibilité en se basant sur le calcul des mailles de 100 m.

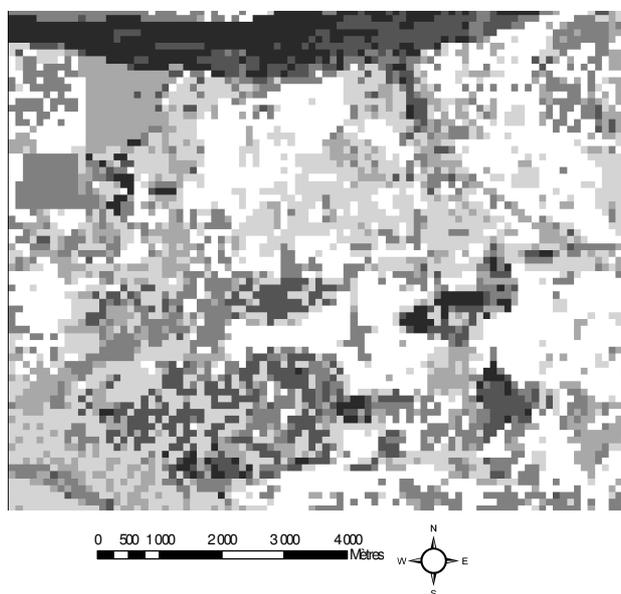


Figure 2.11 Carte de sensibilité (maille = 100 m).

Le temps de calcul est inférieur à 1 minute. Pour ce cas, les mailles sont grosses et la carte n'a pas ainsi une aussi bonne définition que celle du projet du bureau d'étude. Pourtant, elle peut être validée dans le cas où l'aire d'étude est grande (>20 km). La carte indique globalement où se situent la zone très sensible et la zone de moindre sensibilité.

### 3.3.3 Résultats projet N°1 - maille de 50 m

La Figure 2.12 présente la carte de sensibilité en se basant sur le calcul des mailles de 50 m. Le temps de calcul est inférieur à 1 minute. Dans ce cas, la taille de maille a été divisée par deux par rapport au cas précédent, et la carte de sensibilité a une forme similaire à la carte réelle du territoire. On trouve que les zones de sensibilités se distinguent plus clairement les unes des autres.

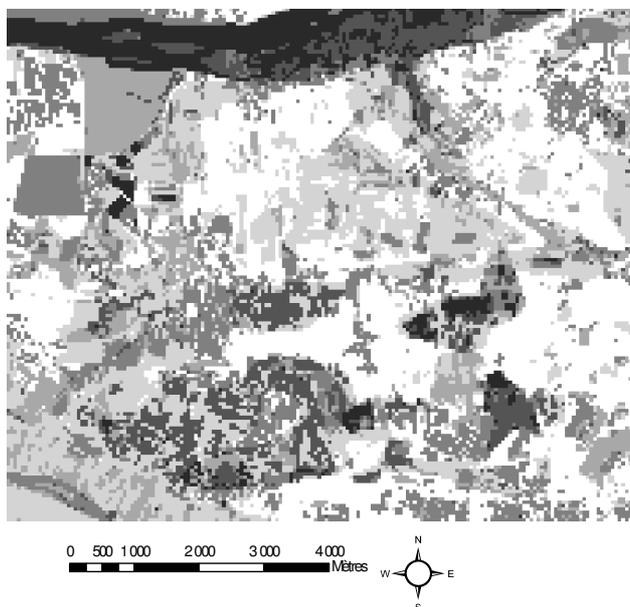


Figure 2.12 Carte de sensibilité (maille = 50 m).

### 3.3.4 Résultats projet N°1 - maille de 25 m

La Figure 2.13 présente la carte de sensibilité en se basant sur le calcul des mailles de 25 m.

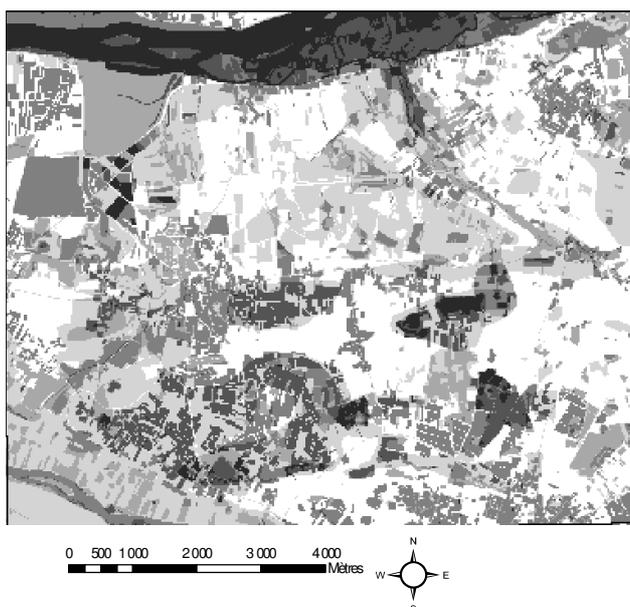


Figure 2.13 Carte de sensibilité (maille = 25 m).

Le temps de calcul est inférieur à 1 minute. Sur cette figure, la maille a été divisée par deux par rapport au cas précédent. La carte reflète bien la forme du territoire et montre localement des zones de sensibilité.

Le temps de calcul n'est pas un critère de différenciation des tailles de mailles. La taille des mailles a un effet certain sur le rendu de la carte de sensibilité. C'est un point qui devra être testé (par la méthode successive de division d'un facteur 2 comme effectué ci-dessus) pour chaque projet par le bureau d'étude en fonction des caractéristiques des aires d'étude.

### 3.4 Analyse de la pondération des cartes thématiques (maille de 100 m)

On considère ci-après 2 cas de pondération des cartes thématiques. Le calcul est réalisé sur la carte de sensibilité de maille = 100 m.

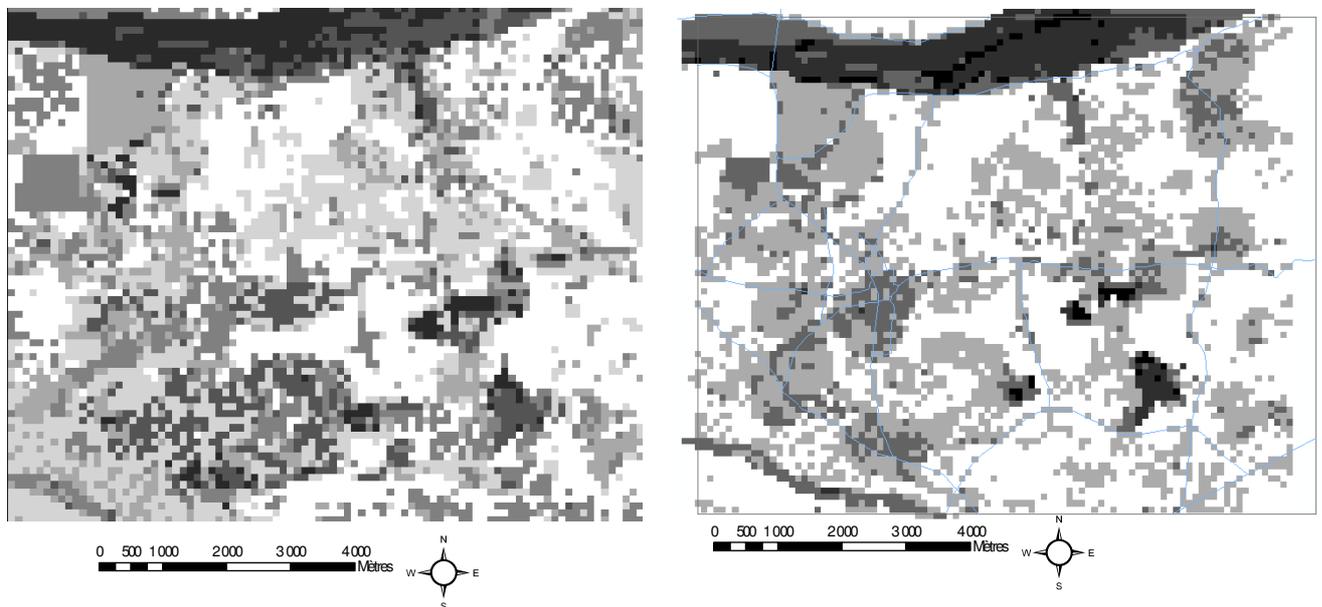
**1<sup>er</sup> cas :  $k_i = 1$  pour tous les milieux.**

La Figure 2.11 présente la carte de sensibilité pour le 1<sup>er</sup> cas. On utilise souvent ce cas dans la pratique.

**2<sup>e</sup> cas :  $k_2=3 ; k_3=2 ; k_5=4 ; k_1=k_4=k_6=1$**

Si l'on considère que l'importance du patrimoine est la plus grande, et qu'ensuite vient celle du milieu naturel, on peut attribuer les valeurs  $k_2=3 ; k_3=2 ; k_5=4 ; k_1=k_4=k_6=1$  pour chaque carte de sensibilité thématique.

La Figure 2.14b présente la carte de sensibilité pour le 2<sup>e</sup> cas :



a) 1<sup>er</sup> cas de pondération (maille =100 m)

b) 2<sup>e</sup>me cas de pondération (maille =100 m)

Figure 2.14 Carte de sensibilité du territoire pour différentes pondérations.

En comparant cette carte en figure 2.14 avec la carte de sensibilité en Figure 2.11, on constate que les positions des zones de sensibilité changent selon les valeurs des coefficients

de pondération. Cela permet de montrer qu'on peut visualiser sans difficulté les effets de l'adaptation des coefficients de sensibilités aux souhaits/besoins des acteurs de la concertation.

### 3.5 Synthèse

La Figure 2.15 présente le plan de calcul possible à retenir de ce paragraphe pour réaliser la carte de sensibilité du territoire et la recherche des variantes de tracé à partir de différentes finesses de mailles et différents coefficients de pondération.

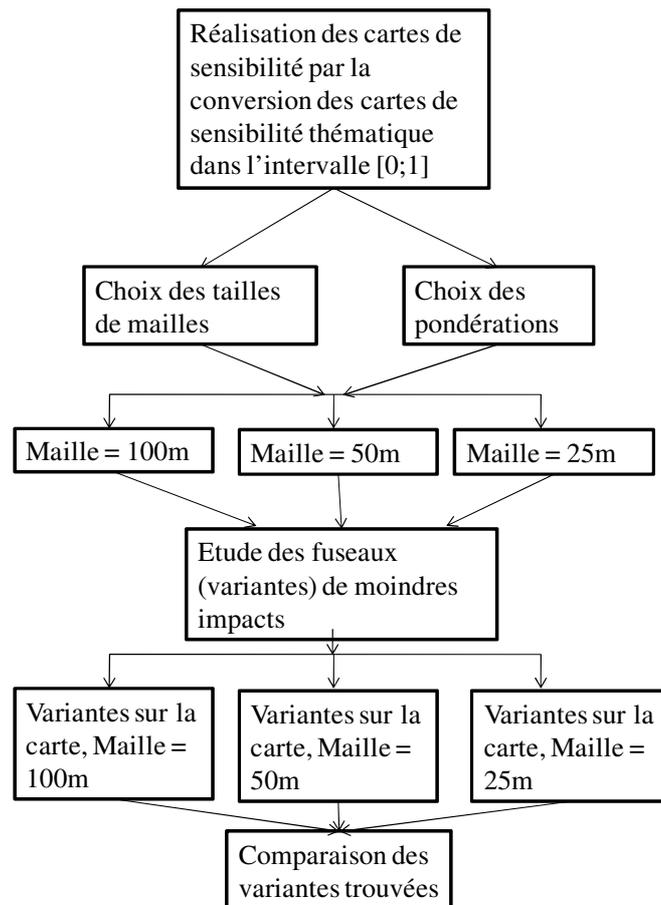


Figure 2.15 Plan d'étude de la carte de sensibilité.

Après la préparation et traitement des données vecteurs (conversion en raster, attribution des valeurs...), on peut réaliser rapidement des cartes de sensibilité avec différentes mailles. Le temps de calcul de ces cartes de sensibilité est inférieur à 1 minute. Cela aide les acteurs dans le travail de réalisation des cartes de sensibilité (grande rapidité et prise en compte de la pondération).

On trouve que les différentes tailles de maille et les différents coefficients de pondération ont une influence sur les cartes de sensibilité.

Les tailles de maille caractérisent la précision du territoire et permettent de bien localiser les zones de forte ou faible sensibilité. Les coefficients de pondération des cartes

thématiques peuvent modifier des positions de zones de sensibilité sur le territoire c'est donc à manier avec précaution lors de l'utilisation de l'outil avec des acteurs extérieurs.

## 4 ÉTUDE DES VARIANTES DE MOINDRE SENSIBILITÉ – EFFETS DE DIFFÉRENTES TAILLES DE MAILLES

A partir de la carte de sensibilité du territoire, on détermine des fuseaux de passage pour la route. La largeur des fuseaux dépend de l'échelle de l'aire d'étude et la classe de la route. Par exemple pour un projet d'autoroute ou route nationale, la largeur du fuseau est prise de 1 000 m. Pour les projets dont les aires d'études sont réduites, on peut chercher directement des tracés. C'est le cas du projet pris comme exemple ci-dessous.

### 4.1 Définition des points d'origine A et d'arrivée B à relier

Dans cette partie, on cherche des variantes de tracé sur la carte de sensibilité calculée du projet N°1. Dans ce programme défini par le maître d'ouvrage, il s'agit de relier une sortie d'agglomération (points-origines A1 ou A2) à une route préexistante sur laquelle différentes solutions de connexion sont envisageables (points-destinations B1, B2 ou B3) comme l'indique dans la Figure 2. 16. Les points sont définis par le bureau d'étude. On utilise ArcGIS pour chercher directement des variantes de tracé. La taille de maille est un paramètre dans ce calcul.

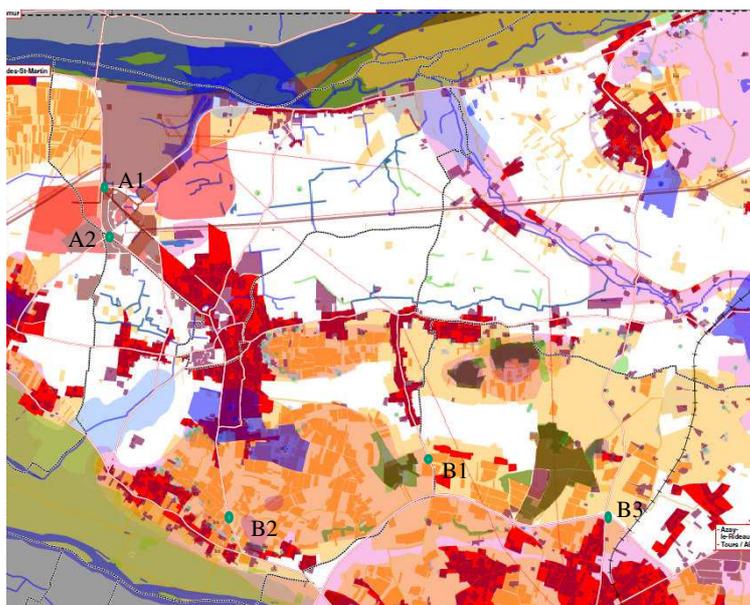


Figure 2. 16 Points origines et destinations du parcours

L'objectif de cette partie est de présenter la méthode de recherche des variantes de tracé et l'étude de la sensibilité des mailles dans les calculs. Pour cette raison, on étudie 3 tailles de maille du territoire : 100 m ; 50 m ; 25 m. Les tailles de maille adaptent au projet N°1.

Les variantes trouvées par le calcul seront comparées avec les variantes obtenues par le bureau d'étude. Sur chaque carte de résultat, on présente donc toutes les variantes du bureau d'étude (V1, V2, V3, V4, V5) afin de faciliter la comparaison des résultats de calcul des variantes.

On cherche donc des variantes qui lient des points A1 avec B1 ; A2 avec B2. Pour la variante qui lie des points A1 avec B3, l'existence de plusieurs zones de moindre sensibilité

crée un itinéraire de moindre sensibilité mais rallonge très nettement le parcours. On ne considère pas les solutions A1 et B3.

## 4.2 Variante pour la carte de sensibilité dont la maille vaut 100 m

### 4.2.1 Recherche de la variante A1\_B1

La Figure 2.17 présente en trait fort le résultat de calcul de la variante A1\_B1 (soit au niveau de la variante v4 du bureau d'études). Cette variante traverse les zones blanches de la carte de sensibilité et a tendance à traverser d'ouest en est, puisqu'elle descend vers le sud.

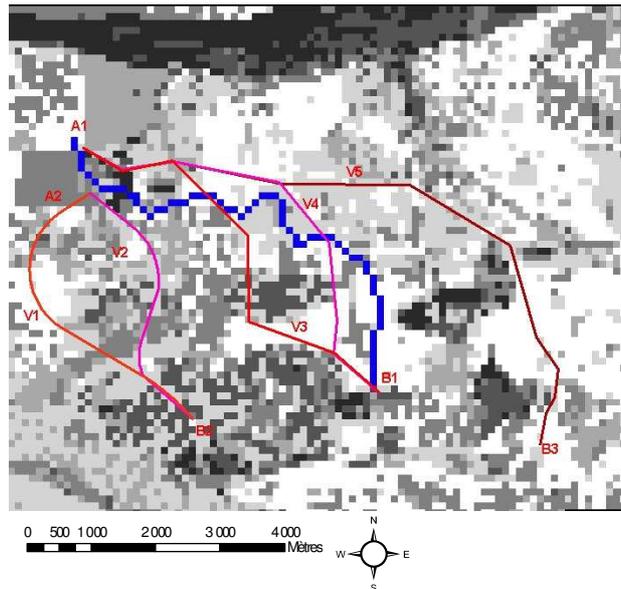


Figure 2.17 Variante A1\_B1 (maille = 100 m ; carte [0 ; 1]).

### 4.2.2 Recherche de la variante A2\_B2

La Figure 2.18 présente le résultat de calcul de la variante A2\_B2. Cette variante a tendance à tourner vers l'est et ensuite à descendre vers le sud (elle approche la variante v2 du bureau d'études mais n'est pas non plus très proche de celle-ci comme pour A1-B1). Elle est par contre parallèle à des variantes obtenues par le bureau d'étude.

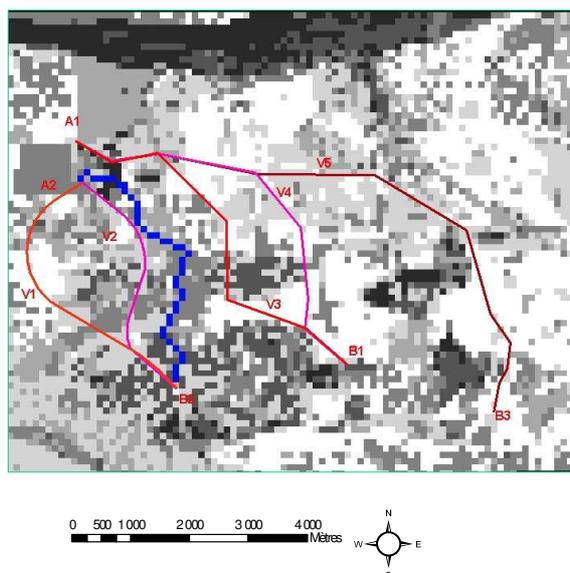


Figure 2.18 Variante A2\_B2 (Maille = 100 m ; carte [0 ; 1]).

### 4.3 Variante pour la carte de sensibilité dont la maille vaut 50 m

La même recherche de tracé est effectuée mais en affinant la taille de maille.

#### 4.3.1 Recherche de la variante A1\_B1

La Figure 2.19 présente le résultat de calcul de la variante A1\_B1. Par rapport au tracé en Figure 2.17 et Figure 2.18, l'épaisseur du trait est plus petite ce qui est tout à fait normal puisque la largeur de trait qui matérialise la largeur de route est rigoureusement égale à la taille de maille.

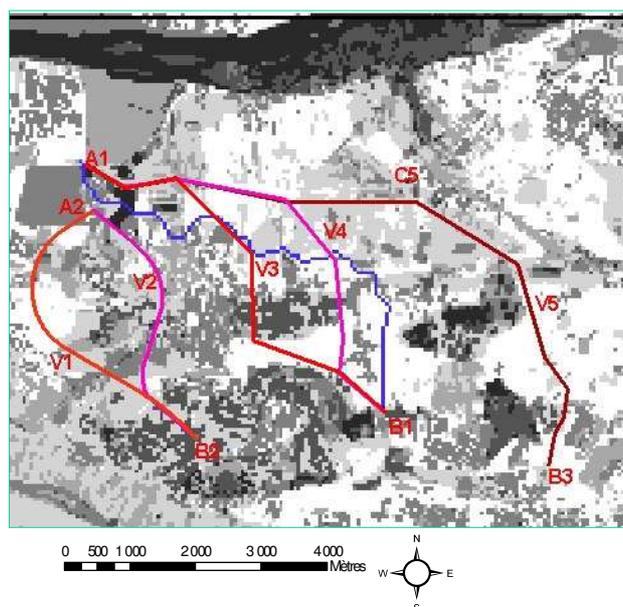


Figure 2.19 Variante A1\_B1 (maille = 50 m ; carte [0 ; 1]).

On constate globalement que par rapport au maillage précédent l'allure générale du tracé est conservée mais que la sinuosité de l'infrastructure était un peu plus grande pour une maille de 100 m.

#### 4.3.2 Recherche de la variante A2\_B2

La Figure 2.20 illustre le résultat de calcul de la variante A2\_B2 : le même commentaire que pour la variante A1\_B1 sur l'allure du tracé et la sinuosité s'applique.

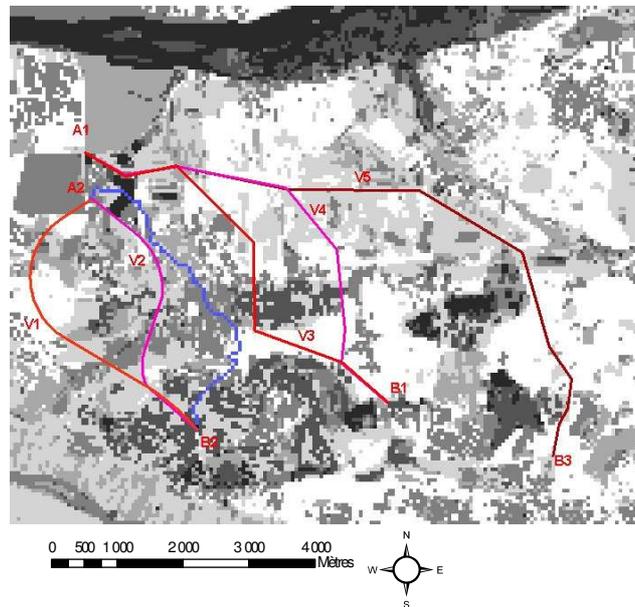


Figure 2.20 Variante A2\_B2 (maille = 50 m ; carte [0 ; 1]).

#### 4.4 Variante sur la carte de sensibilité dont la maille vaut 25 m

##### 4.4.1 Recherche de la variante A1\_B1

La Figure 2.21 montre le résultat de calcul de la variante A1\_B1. Là encore le tracé est proche de celui obtenu avec la taille de maille précédente et moins sinueux.

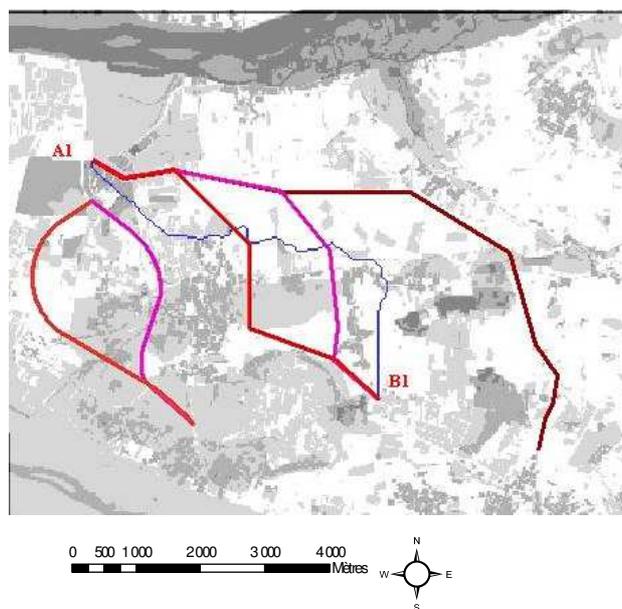


Figure 2.21 Variante A1\_B1 (maille = 25 m ; carte [0 ; 1]).

#### 4.4.2 Recherche de la variante A2\_B2

La Figure 2.22 présente le résultat de calcul de la variante A2\_B2 qui est proche également du tracé A2\_B2 précédent. On peut donc penser à ce stade que la méthode de détermination de la zone de passage de la variante est assez robuste..

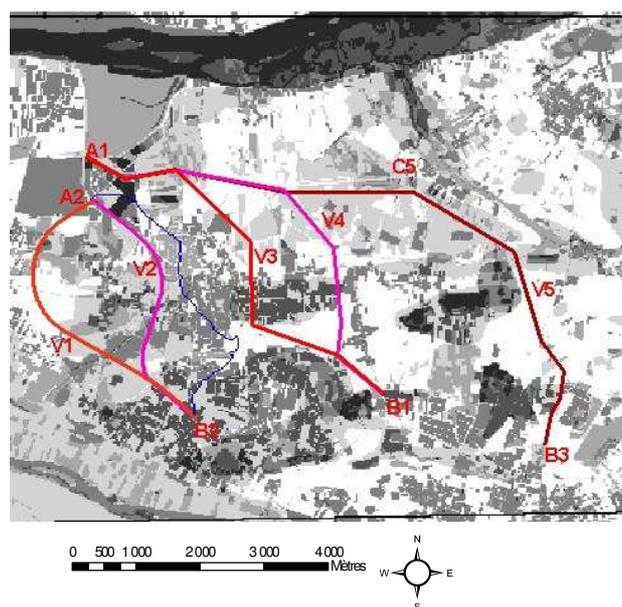


Figure 2.22 Variante A2\_B2 (Maille = 25 m ; carte [0 ; 1]).

#### 4.5 Synthèse sur l'influence du maillage sur l'obtention des variantes

Après la recherche des variantes sur la carte [0 ; 1] avec différentes mailles, la comparaison effective de ces variantes est réalisée afin d'examiner en détails les différences obtenues. Toutes les variantes sont donc représentées sur une même carte pour faciliter la comparaison.

La Figure 2.23 présente la comparaison de la variante A1\_B1. On constate que la variante trouvée à partir du calcul de la maille de 100 m est la plus proche de celle proposée par le bureau d'étude sans pour autant que les tracés ne soient superposés.

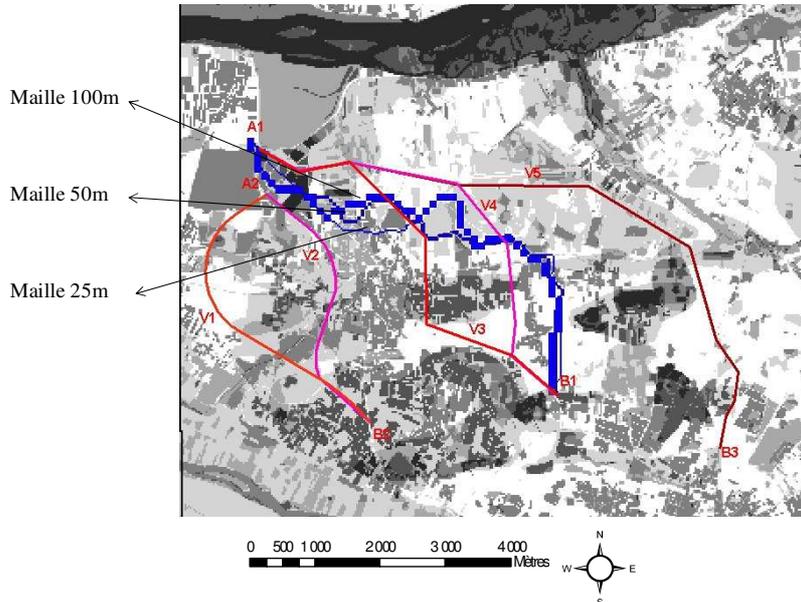


Figure 2.23 Comparaison de la variante A1\_B1 (carte [0 ; 1]).

La Figure 2.24 présente la comparaison pour la variante A2\_B2: les variantes sont différentes de la variante du bureau d'étude car le bureau d'étude permet de faire passer la route dans quelques endroits sensibles pour éviter un parcours très long ce qui n'est pas une option de recherche utilisée par le logiciel qui au contraire évite de telles zones .

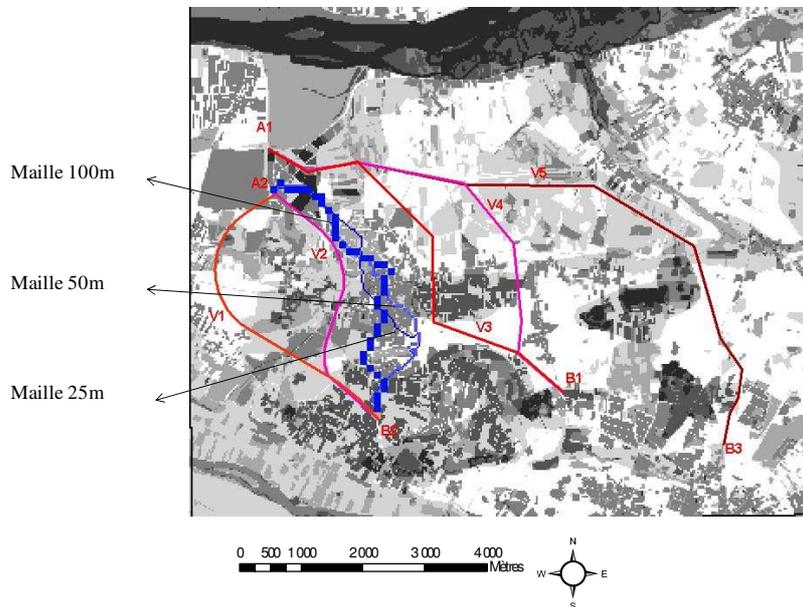


Figure 2.24 Comparaison de la variante A2\_B2 (carte [0 ; 1]).

## 4.6 Influence de la pondération des thématiques sur l'obtention des variantes pour une maille de 100 m

On distingue 2 cas de pondération des cartes thématiques dont els coefficients sont rassemblés dans le tableau 2.8.: Si l'on considère que l'importance du milieu naturel est la plus grande, suivies par celles du milieu physique et de l'urbanisme, et finalement par celles du patrimoine et du paysage, on peut attribuer des valeurs comme illustré dans le Tableau 2.8

Tableau 2.8 Pondération des thématiques.

Milieu	Physique	Naturel	Urbanisme	Agricole	Patrimoine	Paysage
Valeur de pondération ki (1 <sup>er</sup> cas)	1	1	1	1	1	1
Valeur de pondération ki (2 <sup>ème</sup> cas)	5	6	5	1	3	2

On compare les variantes de tracé trouvées pour chaque maille dans ces 2 cas de pondération afin de voir si les coefficients de pondération amplifient les différences.

### 4.6.1 Recherche de la variante A1\_B1 avec pondération

La Figure 2.25 présente la comparaison de la variante A1\_B1 dans les 2 cas de pondération. Dans le 1<sup>er</sup> cas, la variante A1\_B1 est plus proche de celle trouvée par le bureau d'étude que celle du 2<sup>e</sup> cas. Cela s'explique par le fait que le bureau d'études prend un même système de pondération des thématiques (K=1) car le bureau d'étude considère que l'importance de toutes les thématiques est la même. Il ya une différence importante au milieu des tracés sur une portion de longueur limitée entre les deux situations de pondération.

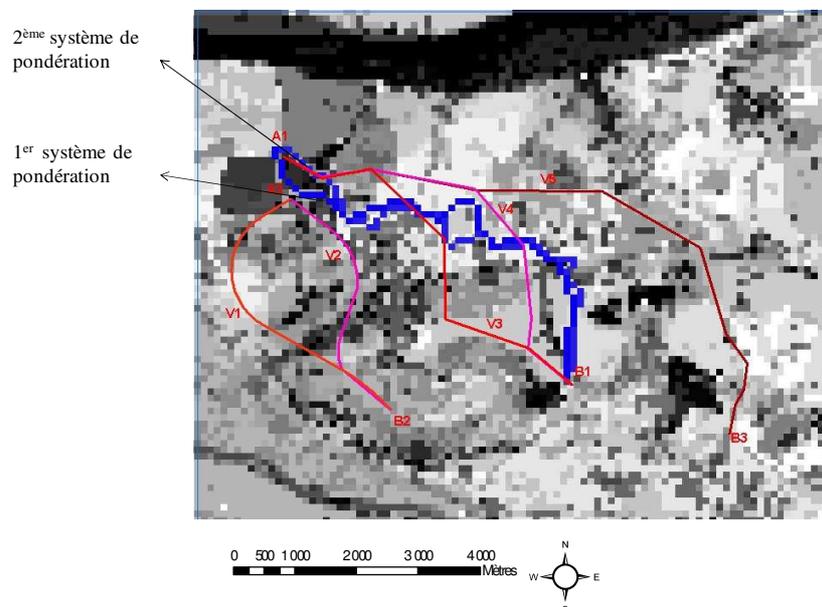


Figure 2.25 Comparaison des variantes de 2 cas de pondération pour la variante A1\_B1.

#### 4.6.2 Recherche de la variante A2\_B2 avec pondération

La Figure 2.26 présente la comparaison de la variante A2\_B2 dans les 2 cas de pondération. Dans le 1<sup>er</sup> cas, la variante A2\_B2 est plus proche de celle trouvée par le bureau d'étude que celle du 2<sup>e</sup> cas. Cela s'explique également par le fait que le bureau d'étude prend un même système de pondération des thématiques ( $K = 1$ ) et confirme la tendance précédente. On constate que les nouvelles variantes sont très différentes ici en fonction de la pondération des thématiques. Ceci s'explique par la modification des cartes de sensibilité selon des coefficients de pondération, et le nombre d'endroits de moindre sensibilité traversés.

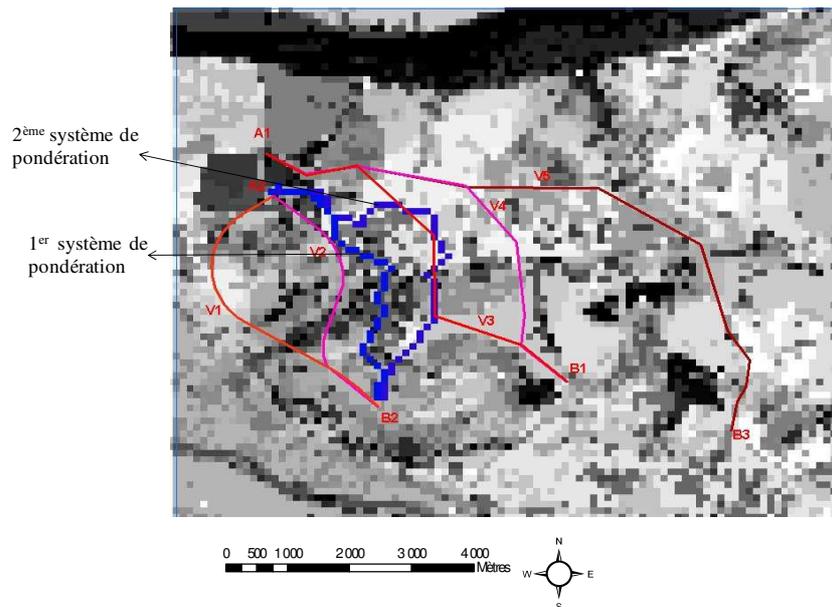


Figure 2.26 Comparaison des variantes de 2 cas de pondération pour la variante A2\_B2.

### 4.7 Comparaison des tracés obtenus par ArcGIS à ceux obtenus par le bureau d'étude

#### 4.7.1 Constatations des différences

Les orientations des variantes ne sont pas très différentes entre les deux méthodes car elles se basent sur le principe de faire passer la route dans les zones de moindre sensibilité. Pourtant, les variantes de tracé traversent bien les zones de moindre impact qui ne correspondent pas forcément au résultat obtenu avec la méthode « manuelle » du bureau d'étude, ce dernier prenant en compte plusieurs critères (rayon transversal, longueur maximale ou minimale d'un tronçon...) complémentaires qui semble-t-il amènent des différences significatives.

#### 4.7.2 Étude dans le cas de points de passage obligés

Les calculs sont réalisés avec la maille de 100 m car c'est le cas plus proche de la variante du bureau d'étude.

Afin d'intégrer les pratiques dans le calcul, on importe des points de passage obligés C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, ..., C<sub>5</sub> dans la recherche des variantes de tracé. Le Tableau 2.9 présente les noms des variantes traversant des points de passage obligés.

Tableau 2.9 Noms des variantes traversant des points de passage obligés.

Nom de variante	Liée 2 points A1, B1			Liée 2 points A2, B2		Liée 2 points A1, B3
	A1_C1_B1	A1_C2_B1	A1_C3_B1	A2_C21_B2	A2_C22_B2	A1_C5_B3

On présente ci-dessous des calculs effectués avec ces points.

#### 4.7.2.1 Pour la variante qui lie 2 points A1, B1

En supposant que le point de passage obligé soit C1, le résultat de calcul de la variante A1\_C1\_B1 est illustré dans la Figure 2.27. En supposant que le point de passage obligé soit C2, le résultat de calcul de la variante A1\_C2\_B1 est illustré dans la Figure 2.28

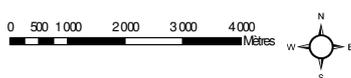
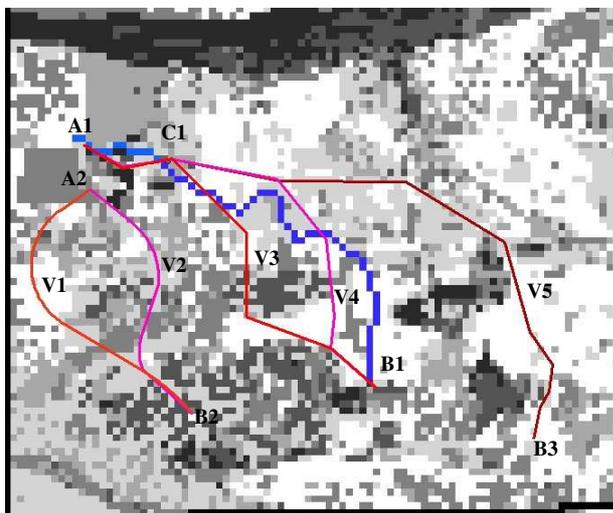


Figure 2.27 Variante A1\_C1\_B1.

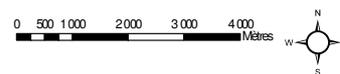
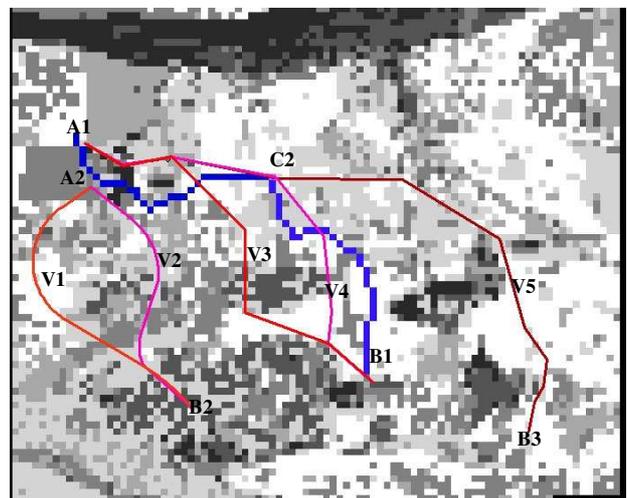


Figure 2.28 Variante A1\_C2\_B1.

En supposant que le point de passage obligé soit C3, le résultat de calcul de la variante A1\_C3\_B1 est illustré dans la Figure 2.29. En supposant que le point de passage obligé soit C4, le résultat de calcul de la variante A1\_C4\_B1 est illustré dans la Figure 2.30.

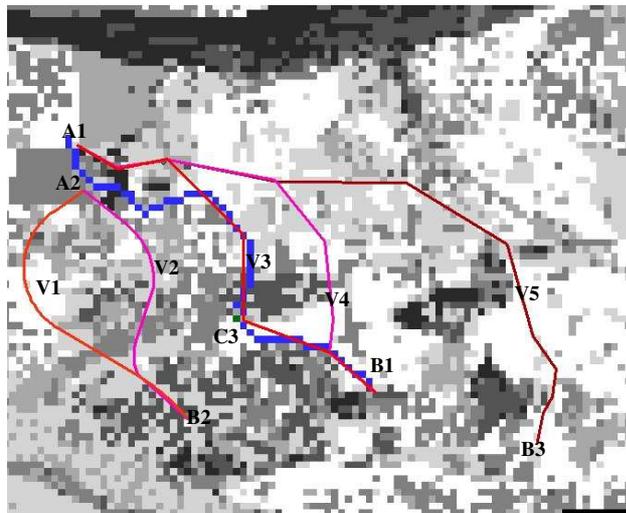


Figure 2.29 Variante A1\_C3\_B1.

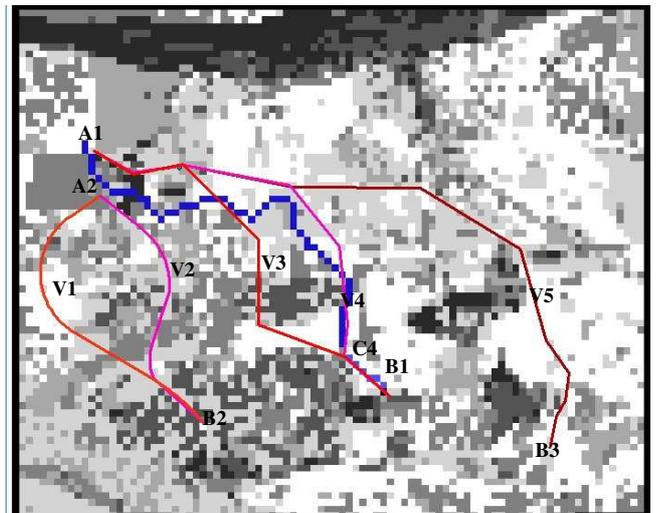


Figure 2.30 Variante A1\_C4\_B1.

En comparaison des résultats de calcul des variantes liant 2 points A1, B1 et des points de passage obligé avec la variante obtenue du bureau d'étude, on trouve que les nouvelles variantes sont plus proches que la variante obtenue manuellement. Par conséquent, ces calculs montrent la capacité d'insertion des points de passage obligé, ce qui permet de prendre en compte les avis des acteurs du projet routier. De plus, le temps de calcul est très rapide (moins de 1 minute), ce qui facilitera la décision des acteurs.

L'outil diminue le temps de travail du bureau d'étude et augmente la précision dans la recherche des variantes. De plus, les acteurs peuvent communiquer avec l'outil et modifier le parcours en introduisant des points de passage obligé.

#### 4.7.2.2 Pour la variante qui lie 2 points A2, B2

En supposant que le point de passage obligé soit C21, le résultat de calcul de la variante A2\_C21\_B2 est illustré dans la Figure 2.31. En supposant que le point de passage obligé soit C22, le résultat de calcul de la variante A2\_C22\_B2 est illustré dans la Figure 2.32.

En comparaison des résultats de calcul des variantes liant 2 points A2, B2 et des points de passage obligé avec la variante obtenue par le bureau d'étude, on trouve que les nouvelles variantes sont plus proches de la variante obtenue mais toujours pas exactement superposées.

Ces calculs montrent la capacité d'insertion des points de passage obligé qui permet de prendre en compte des avis des acteurs du projet routier et de leur montrer de manière interactive et convaincante qu'une telle démarche influe sur le tracé au final. De plus, le temps de calcul est très rapide (moins de 1 minute), ce qui facilitera la discussion en vue d'une décision des acteurs.

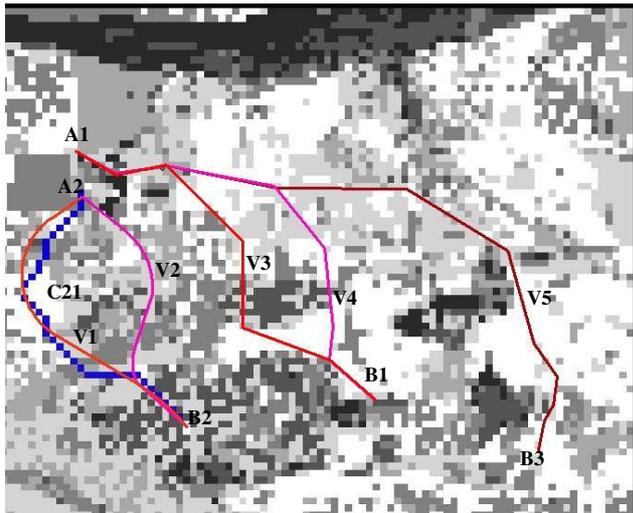


Figure 2.31 Variante A2\_C21\_B2.

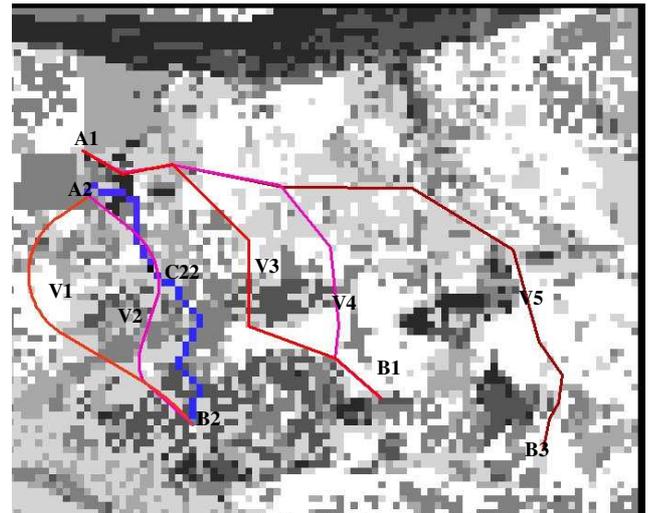


Figure 2.32 Variante A2\_C22\_B2.

#### 4.7.2.3 Pour la variante qui lie 2 points A1, B3

En supposant que le point de passage obligé soit C6, le résultat de calcul de la variante A1\_C6\_B3 est illustré dans la Figure 2.33. Le tracé n'est pas trop éloigné de celui de la variante v5.

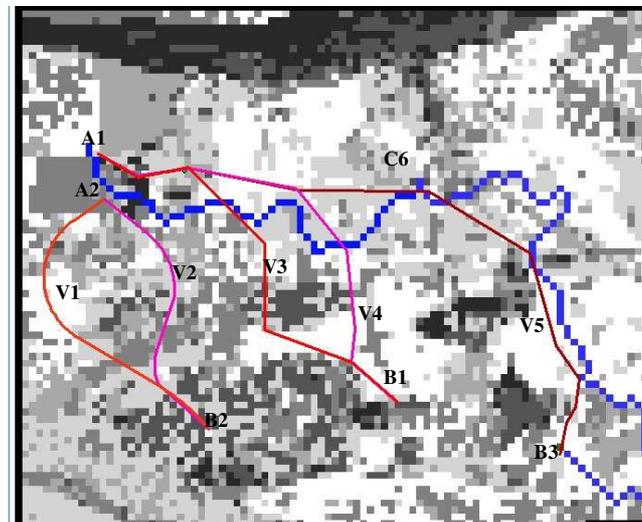


Figure 2.33 Variante A1\_C6\_B3.

En comparaison des résultats de calcul des variantes liant 2 points A1, B3 et des points de passage obligé avec la variante obtenue du bureau d'étude, on trouve que les nouvelles variantes sont encore éloignées de la variante obtenue. Pour obtenir un meilleur résultat, il s'avère nécessaire d'insérer un plus grand nombre de points de passage obligés.

## **5 CONCLUSION**

La méthode utilisée dans ce chapitre se base sur l'attribution de valeurs chiffrées aux enjeux qui sont classés par des spécialistes. Grâce à la fonction de calcul dans ArcGIS, des cartes de sensibilité correspondant à différentes tailles de mailles sont calculées. La taille utilisée pour chaque carte est définie en se basant sur la demande de précision ou par le classement de la route. De plus, la pondération de tous les enjeux dans une thématique ou de toutes les thématiques peut être réalisée rapidement. Par la suite, on applique la fonction « chemin le plus court » de Spatial Analyst pour trouver des variantes de moindre sensibilité reliant les points de départ et d'arrivée. Bien que ces variantes trouvées avec ArcGIS ne soient pas forcément réalisables du fait des contraintes techniques qu'il sera nécessaire de prendre en compte par la suite, ce travail aide le bureau d'étude à proposer de nouvelles variantes qui peuvent être tracées rapidement et modifiées suivant les coefficients de pondération retenus des variantes calculées.

Cette méthode offre donc un outil d'aide à la recherche de tracé optimal et d'aide à la concertation, laissant au bureau d'étude et au maître d'ouvrage le choix des pondérations et de fixation des points de passage obligés.

Dans le chapitre suivant, nous allons proposer des méthodes de calcul des effets des variantes de tracé qui sont nécessaires à la comparaison.



## **CHAPITRE 3**

# **INDICATEURS ET MÉTHODE DE CALCUL D'EFFETS GLOBAUX ET LOCAUX DE L'INSERTION DE L'INFRASTRUCTURE ROUTIÈRE**

## **1 INTRODUCTION**

Dans le contexte actuel et d'après l'analyse des pratiques faite au chapitre 1, des spécialistes de différents domaines évaluent chaque variante de tracé suivant différents critères et acteurs concernés. Certains indicateurs proviennent de calculs physiques ou d'autres origines (par la modélisation, par les avis des acteurs...). Par exemple, en ce qui concerne la nuisance sonore, les acousticiens modélisent le territoire et réalisant des cartes d'isophones et en évaluant la variante de tracé suivant le niveau de bruit. Le bureau d'étude compte le nombre de maisons de part et d'autre de la route (< 200 m) qui subissent un niveau sonore > 55 dB(A). La variante de tracé ayant une nuisance sonore faible est favorisée par les riverains de la route. Des agriculteurs s'intéressent aux surfaces agricoles prises par la nouvelle route, etc. Les variantes doivent donc être évaluées selon différents critères, pour différents domaines en utilisant différents indicateurs.

De plus, il reste plusieurs critères pour lesquels l'évaluation des impacts est encore qualitative, ce que le bureau d'étude souhaite améliorer en proposant de nouveaux indicateurs. Autant que possible, le bureau d'étude souhaite obtenir une représentation graphique discriminante entre les variantes afin de permettre des discussions avec ses clients.

Ce chapitre présente en détails la méthode retenue pour le calcul d'un jeu d'indicateurs relevant du développement durable et visant à évaluer différentes variantes de projets d'infrastructures.

La première partie du chapitre précise les principes de la démarche de calcul des indicateurs dans ce contexte et décrit les types d'indicateurs développés.

La deuxième partie précise toutes les hypothèses de calcul d'un ensemble d'indicateurs proposés dans la thèse et s'accompagne d'éléments bibliographiques pour chaque indicateur. Les techniques de calcul avec ArcGIS sont explicitées au fur et à mesure.

## **2 PRINCIPES DE LA DÉMARCHE**

Il existe différents types d'indicateurs : la méthode de calcul et de traitement de ces indicateurs dépendent de leur nature. Pour cela, l'outil à développer doit prendre en compte des résultats de calcul d'autres logiciels métiers utilisés par le bureau d'études ou qui permettent d'effectuer des calculs sous ArcGIS.

La Figure 3. 1 présente un schéma de la méthode de calcul général d'un indicateur selon les pratiques du bureau d'étude ou les possibilités envisagées au cours de la thèse. Ici, les indicateurs sont calculés par le logiciel ArcGIS ou par d'autres logiciels spécialisés. Soit le résultat de calcul par ces logiciels est compatible avec ArcGIS, soit il est traité manuellement dans ArcGIS. L'outil SIG permet de présenter des résultats sous forme de cartes. Pour le choix d'une meilleure variante d'infrastructure, les indicateurs sont pondérés selon les avis des spécialistes et des acteurs du projet. Ce travail est traité dans le chapitre 4.

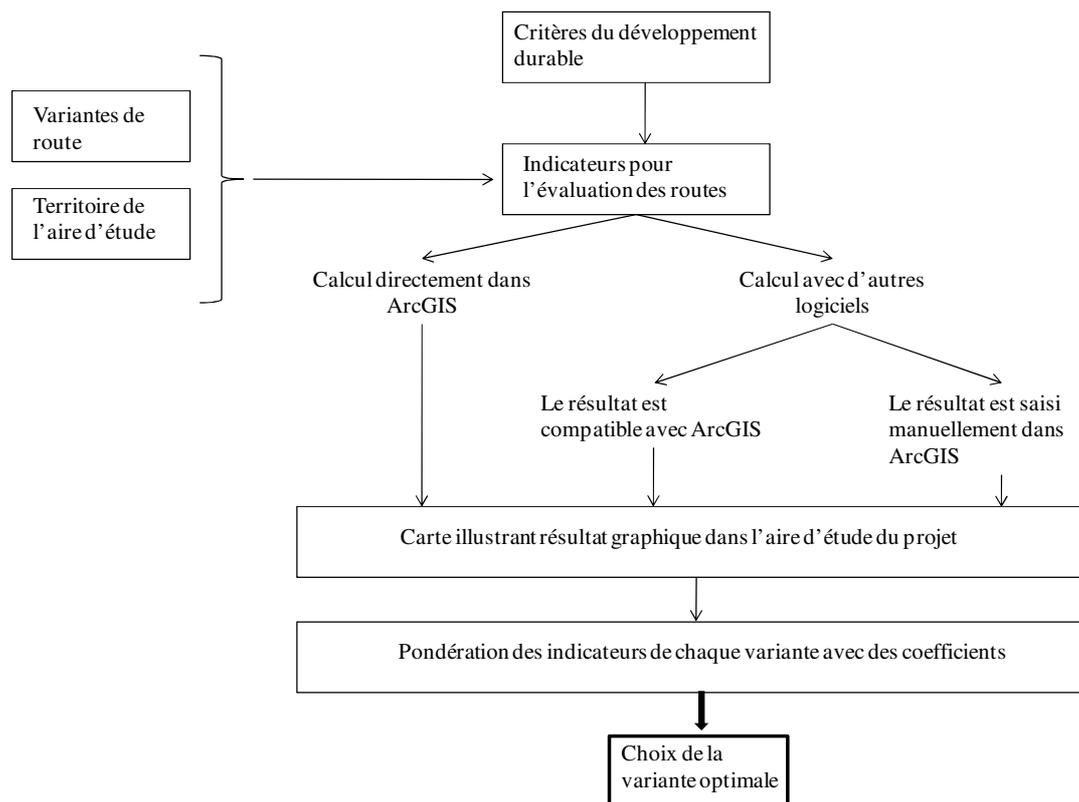


Figure 3.1 Principe de calcul des indicateurs et choix de la variante optimale.

Ce chapitre décrit des méthodes de calculs d'indicateur pour les projets d'infrastructures. En lien avec les méthodes les indicateurs sont étudiés selon leurs caractéristiques spatiales : scalaire non localisables, ponctuels, linéiques et surfaciques.

Le Tableau 3.1 récapitule le système d'indicateurs ainsi développé pour l'évaluation des variantes de tracé. La synthèse des critères du développement durable a abouti à un ensemble d'effets sur le territoire à prendre en compte qui sont également rappelés en Tableau 3.1 en lien avec le type d'indicateurs.

Tableau 3.1 Effets pour les indicateurs sont développés en lien avec leur nature graphique.

Types d'indicateurs	Indicateurs développées
Scalaire non localisables	Impacts globaux environnementaux Effet sur les écosystèmes
Ponctuels localisés	Créations des intersections
Segments/linéiques	Effets sur le patrimoine bâti et sur le milieu naturel Nuisance sonore Effet sur la facilité/ intérêt du parcours Effet sur la vision du territoire
Surfaciques	Réduction des surfaces disponibles Rayonnement sur le territoire

## 3 INDICATEURS DÉVELOPPÉS

### 3.1 Indicateurs scalaires

Dans cette partie, on présente des méthodes de calcul de deux indicateurs : « impacts globaux environnementaux » et « fragmentation des écosystèmes – effet sur les écosystèmes ».

#### 3.1.1 Impacts globaux environnementaux

##### 3.1.1.1 Définition des catégories d'impact

L'analyse de cycle de vie (ACV) est une évaluation des impacts sur l'environnement d'un système comprenant l'ensemble des activités associées à un produit, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à l'élimination des déchets. Cette méthode a été appliquée au domaine routier dans le cadre de thèses précédentes du LCPC qui ont permis de développer un outil d'évaluation environnementale des chaussées routières et des terrassements (Hoang., 2005 ; Sayagh, 2007), aboutissant au logiciel Ecorce (Ventura et al., 2004).

Au sens de la norme ISO/FDIS 14 040, l'ACV est définie comme la compilation et l'évaluation des entrants et des sortants, ainsi que des impacts potentiels environnementaux d'un système de produits au cours de son cycle de vie. Il s'agit d'évaluer un système de procédés et de transports associés à un produit ou un service en identifiant et en quantifiant les flux entrants (énergie, masses de matériaux) et les flux sortants émis dans chacun des compartiments du milieu environnant (eau, air, sol), puis d'en évaluer les impacts environnementaux potentiels. Toutes les phases du cycle de vie du produit ou du service sont en principe prises en compte pour le calcul des impacts, depuis l'extraction et la fabrication des matières premières, jusqu'à la fin de vie (recyclage/ mise en décharge) en intégrant les étapes de transformation, transport, distribution, utilisation, maintenance...

##### 3.1.1.2 Expression des indicateurs ACV

Les flux et indicateurs pris en compte dans ce travail concernent les catégories des flux qui caractérisent d'impacts comme suit (Ventura et al, 2004 ; Sayagh, 2007) :

- consommation de matériaux qui somme les quantités de matériaux consommées dans le cas d'étude, en tonnes (t) ou mètres cubes (m<sup>3</sup>) ;
- énergie consommée qui totalise pour la fabrication des matières premières et matériaux, celui exprimée en équivalents énergétiques (MJ) de toutes les énergies primaires et secondaires totales consommées, qu'elle qu'en soit la nature (gaz, fossile, pétrole, nucléaire) au l'origine ;
- consommation d'eau (m<sup>3</sup>) qui résulte un calcul soit de données unitaires d'inventaire liées à la production de matières premières (bitume, granulats) soit de données de formulation des matériaux routiers (béton) ou de mise en œuvre (compactage) et qui sont calculées après avoir précisé la nature des couches de chaussée ;
- effet de serre qui est provoqué par l'accumulation de certains gaz dans l'atmosphère qui absorbent une partie du rayonnement infrarouge réfléchi par la surface de la terre. Une partie de l'énergie solaire reste ainsi piégée dans les basses couches de l'atmosphère et provoque une augmentation de la température globale du globe (Goedkoop et al. 2001) ;

- eutrophisation qui est une réduction de la qualité de l'eau qui devient opaque, malodorante et de goût déplaisant, et est due à un excès en matière organique et en micro-organismes. L'eutrophisation modifie aussi la composition des espèces ;
- acidification : est due à une augmentation de substances à propriétés acides dans l'air, qui au contact de l'humidité atmosphérique forment des pluies ou brouillards acides qui corrodent les métaux, altèrent les édifices en pierre, détruisent la végétation et acidifient les lacs en provoquant la mort des espèces aquatiques (Setra, 2001) ;
- ozone photochimique : la formation d'ozone troposphérique est liée à une série de réactions impliquant des espèces carbonées et l'action de rayons ultraviolets (Setra, 2001) ;
- ecotoxicité : discipline dont l'objet est l'étude des polluants dans les écosystèmes. L'écotoxicologie comporte un aspect descriptif qui consiste en l'analyse de la circulation des polluants dans la biosphère et dans les écosystèmes entre les biotopes et les communautés vivantes (Ramade, 2000) ;
- toxicité : particularité propre à diverses substances dont l'absorption a pour effet de perturber le métabolisme des êtres vivants, provoquant des troubles physiologiques pouvant aller jusqu'à la mort des individus exposés. En fonction de l'intensité et de la rapidité des effets, on distingue une toxicité aiguë, une toxicité subaiguë et une toxicité à long terme encore dénommée toxicité chronique, résultant de l'exposition permanente à de faibles concentrations d'un toxique (Ramade, 2000).

Les formules de calcul de ces indicateurs et leurs unités sont rappelés ci-après.

#### a) Effet de serre

L'indicateur (GWP) est le potentiel de réchauffement global (GIEC, 2007). Le GWP d'une substance est défini par l'intégrale, sur une durée donnée, du forçage radiatif (augmentation ou diminution de l'échange d'énergie par rayonnement) généré par 1 kg de gaz, injecté instantanément dans l'atmosphère. Le GWP est rapporté au CO<sub>2</sub> et est calculé de la manière suivante (Khalifa, 2000)

$$GWP_i = \frac{\int_0^T a_i c_i(t) dt}{\int_0^T a_{CO_2} c_{CO_2}(t) dt} \quad (Eq. 3. 1)$$

avec :

$a_i$  : absorption de la radiation thermique suite à une augmentation de la concentration du gaz  $i$

$c_i(t)$  : concentration du gaz «  $i$  » restant au temps  $t$  après son émission

$T$  : nombre d'années sur lesquels l'intégration est effectuée

Le coefficient ainsi déterminé est multiplié par les flux des substances concernées, donnant une valeur finale exprimée en kg d'équivalent CO<sub>2</sub>. Les valeurs de GWP <sub>$i$</sub>  retenues considèrent le plus souvent un calcul intégral effectué sur une durée de 100 ans, qui correspond à la durée de vie d'une molécule de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère (GIEC, 2007).

#### b) Eutrophisation

L'indicateur (EI) correspond à la somme de tous les précurseurs d'eutrophisation, en multipliant la masse mesurée par son facteur d'équivalence. Il est mesuré par la forme d'équivalents phosphates  $\text{PO}_4^{3-}$  (EPA, 2000).

Les facteurs d'équivalence sont calculés de la manière suivante :

$$EI_i = \frac{m_i^P}{\mu_i} \times \frac{\mu_{\text{PO}_4^{3-}}}{\mu_{\text{PO}_4^{3-}}^P} \quad (\text{Eq. 3. 2})$$

avec :

$EI_i$  : masse en  $\text{PO}_4$  ayant le même effet potentiel qu'une unité de masse de la substance  $i$

$m_i$  : potentiel de biomasse en en équivalents phosphates

$\mu_i$  : masse molaire de la substance  $i$

$\mu_{\text{PO}_4}$  : masse molaire du phosphate

Le coefficient ainsi déterminé est multiplié par les flux des substances concernées, donnant une valeur finale exprimée en kg d'équivalent  $\text{PO}_4^{3-}$

#### c) Acidification

Le potentiel d'acidification (AP) est calculé par le rapport du nombre d'équivalents en protons  $\text{H}^+$  par unité de masse de la substance sur la valeur de référence du dioxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ ) (Khalifa, 2000)

$$AP_i = \frac{n_i^{\text{H}^+}}{\mu_i} \cdot \frac{\mu_{\text{SO}_2}}{n_{\text{SO}_2}^{\text{H}^+}} \quad (\text{Eq. 3. 3})$$

avec :

$n_i$  : nombre de protons  $\text{H}^+$  correspondant à la forme acide de la substance  $i$

$\mu_i$  : masse molaire de la substance  $i$

$n_{\text{SO}_2}$  : nombre de protons  $\text{H}^+$  correspondant au dioxyde de soufre ( $n_{\text{SO}_2}=2$ )

$\mu_{\text{SO}_2}$  : masse molaire du dioxyde de soufre ( $\mu_{\text{SO}_2}=64 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ )

Le coefficient ainsi déterminé est multiplié par les flux des substances concernées, donnant une valeur finale exprimée en kg d'équivalent  $\text{SO}_2$ .

#### d) Ozone troposphérique

L'indicateur POPC (*Photochemical Ozone Potential Creation*), correspond à la quantité maximale d'ozone formé pour chaque composé organique volatil pris individuellement, pendant 5 jours suivant son émission, par rapport à celle produite pour une même quantité d'éthylène (Altenstedt et Pleijel, 2000). Le phénomène faisant intervenir de multiples espèces chimiques, le calcul des masses d'ozone émises est basé sur des valeurs statistiques de concentrations moyennes des précurseurs en Europe, et sur des modélisations cinétiques (Altenstedt et Pleijel, 2000).

$$POPC_i = \frac{m_{O_3}^i}{m_{O_3}^{éthylène}} \quad (Eq. 3. 4)$$

avec :

$POPC_i$  : indicateur de formation d'ozone

$m_{O_3}^i$  : masse d'ozone produite par 1 kg du précurseur chimique  $i$  (kg) émis dans la basse atmosphère

$m_{O_3}^{éthylène}$  : masse d'ozone produite par 1 kg du précurseur éthylène (kg) émis dans la basse atmosphère.

Le coefficient ainsi déterminé est multiplié par les flux des substances concernées, donnant une valeur finale exprimée en kg d'équivalent éthylène.

#### e) Toxicité et écotoxicité

(Huijbregts et al., 2000) ont proposé un modèle d'indicateur de toxicité et d'écotoxicité adapté à l'ACV en adoptant une démarche issue de la méthodologie d'analyse des risques. Le modèle proposé :

- est identique pour les effets toxicité et écotoxicité mais calcule deux indicateurs différents ;
- différencie les facteurs d'équivalence pour une même substance, en fonction du compartiment d'émission ;
- prend en compte les phénomènes de transferts entre compartiments.

Le modèle (Huijbregts et al., 2000) calcule un facteur d'équivalence pour chaque unité massique d'une substance émise dans un compartiment initial (eau douce, eau de mer, air, sol industriel et sol agricole). La dispersion dans les compartiments finaux (eau douce, eau de mer, sédiments d'eau douce, sédiments marins, sols émergés et homme) est modélisée pour trois grands types de climats (arctique, tempéré et tropical) grâce à l'utilisation du logiciel EUSES 2.0 Ensuite, un ratio de caractérisation du risque (RCR) est calculé comme le rapport entre la dose modélisée et la dose maximale sans effet. Le potentiel toxique est alors calculé à partir des RCR :

$$TP_{i,c_1 \rightarrow c_2} = w_i \cdot \frac{RCR_{i,c_1 \rightarrow c_2}}{RCR_{réf}} \quad (Eq. 3. 5)$$

avec :

$TP_{i,c_1 \rightarrow c_2}$  : potentiel toxique de la substance «  $i$  » émise dans le compartiment  $c_1$  et transférée dans le compartiment  $c_2$

$w_i$  : facteur de pondération dépendant des échelles géographiques des compartiments  $c_1$  et  $c_2$

$RCR_{i,c_1 \rightarrow c_2}$  : ratio de caractérisation du risque de la substance «  $i$  » émise dans le compartiment  $c_1$  et transférée dans le compartiment  $c_2$

$RCR_{réf}$  : ratio de caractérisation du risque de la substance de référence choisie comme étant le 1,4-dichlorobenzène

### **3.1.1.3 Formulation et méthode de calcul retenue avec le logiciel ECORCE 1.1**

Pour différentes techniques de construction de chaussée (Jullien et al., 2011) et terrassements (Jullien et al., 2011), le logiciel ECORCE 1.1 permet de saisir et visualiser des cas d'études de chaussées, par couche de chaussée, par type de déblais-remblais, par type de matériau et par opération.

ECORCE 1.1 permet ainsi de visualiser les résultats suivants à l'écran :

#### Sous forme de tableaux d'inventaire de cycle de vie

- l'inventaire des principales masses ou volumes des matériaux consommés par couche et par opération ;
- l'inventaire total des consommations d'énergie et d'eau et des émissions (flux).

#### Sous forme de graphiques d'indicateurs par opération de construction ou d'entretien

- les consommations en énergie et en eau sont réparties par procédé, par couche, par opération ;
- les indicateurs qui sont répartis par procédé, par couche, par opération sont : effet de serre (GWP), acidification (AP), eutrophisation (EI), formation d'ozone photochimique (POCP), écotoxicité (EP), toxicité chronique (TP).

ECORCE 1.1 dans sa version 1.1.3 disponible en 2010 utilise une base de données environnementales, prédéfinie. Il ne permet pas la saisie de données environnementales propres à l'utilisateur dans la version 1.1.3.

Les types de matériaux routiers saisis dans ECORCE 1.1 sont : les matériaux bitumineux chauds, les graves traités aux liants hydrauliques, les bétons, les enduits bitumineux, les couches d'accrochage, les graves non traitées. De plus, deux autres familles de matériaux respectivement nommées « autres matériaux traités » et « matériaux non traités » ont été créées pour permettre l'introduction de sols dans les constituants.

La Figure 3.2 présente le système de calcul associé au terrassement et la Figure 3.3 celui associé aux chaussées. Les distances de transport bien que non reportées sur les schémas sont paramétrables et peuvent jouer un rôle important.

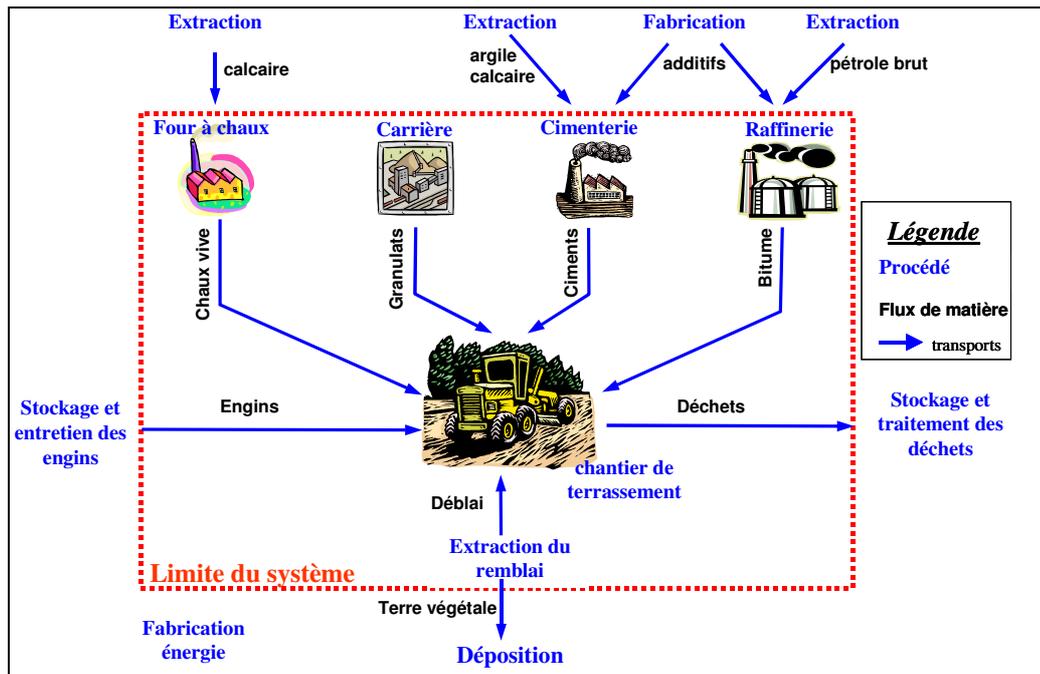


Figure 3.2 Système du terrassement (Hoang, 2005).

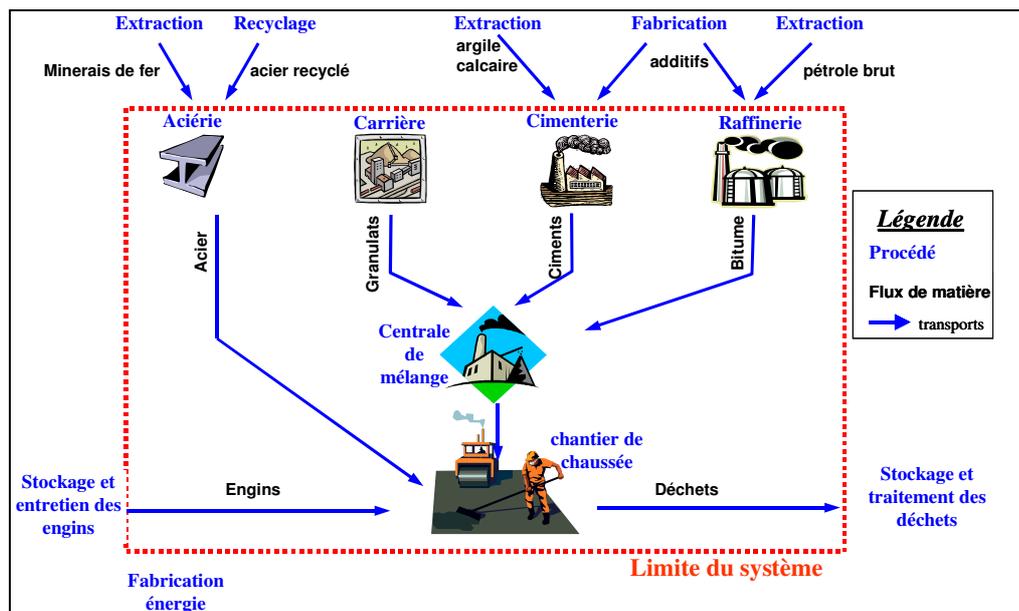


Figure 3.3 Système de la chaussée (Hoang, 2005).

La Figure 3.4 présente l'organigramme de la saisie des données pour un cas d'étude défini. Il permet de saisir différentes couches de chaussées ou terrassements sans distinction entre le stade d'avancement du projet (avant projet, appel d'offres).

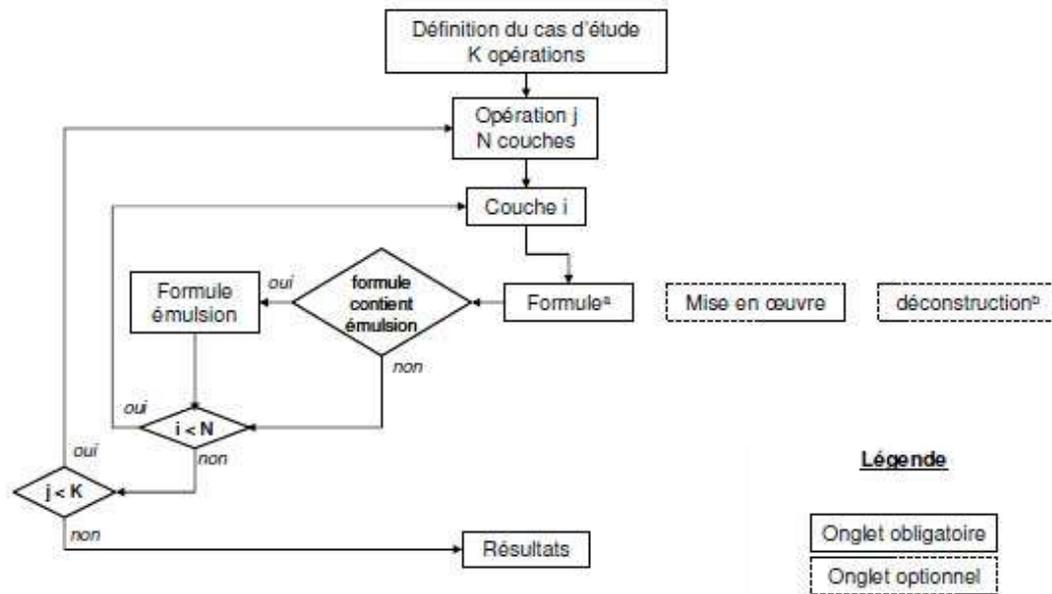


Figure 3. 4 Organigramme de la saisie des données pour un cas d'étude défini.

Il faut donc saisir des informations pour chaque couche de données sur la géométrie (épaisseur, longueur, largeur), sur les types des matériaux utilisés et leurs compositions (enrobé, béton, grave hydraulique,...), des types d'engins utilisés, des distances de transport.

D'après les équations précédentes (3.1 à 3.5), des formules d'indicateurs sont données. Dans le bloc de calcul d'Ecorce 1.1, ces calculs d'indicateurs se font à partir des paramètres de flux et selon les coefficients du Tableau 3.2.

Le calcul des flux et indicateurs totaux est issu du calcul d'indicateurs unitaires correspondant à l'expression suivante (Ventura et al., 2009) :

$$Ind^{j,p} = \sum_{i=1}^k \alpha_i^{j,p} . C_i^j . m_i^p \quad (Eq. 3. 6)$$

avec :

$Ind^{j,p}$  : indicateur de la catégorie d'impact j pour le procédé p (unité spécifique indicateur/ unité de référence du procédé p) ;

$\alpha_i^{j,p}$  : coefficient d'allocation du flux i à la catégorie d'impact j pour le procédé p (sans unité) ;

$C_i^j$  : coefficient de contribution du flux i à la catégorie d'impact j (unité spécifique indicateur/ kg de i) ;

$m_i^p$  : masse du flux unitaire l'émis par le procédé p (kg/unité de référence du procédé p) .

Le Tableau 3.2 récapitule les coefficients de contribution et d'allocation des polluants aux différents types d'indicateurs.

Tableau 3.2 Coefficients de calcul d'indicateur (logiciel Ecorce 1.1.3).

Indicateur	Abréviation	Polluant	Contribution	Allocation
Gaz à effet de serre	GWP (Eq. 3. 1)	CO <sub>2</sub>	1	1
		N <sub>2</sub> O	298	1
		CH <sub>4</sub>	25	1
Eutrophisation	EI (Eq. 3. 2)	NH <sub>3</sub>	0,33	0,25
		NO <sub>x</sub>	0,13	0,167
		aq DCO	0,022	1
		aq N total	0,42	1
Acidification	AP (Eq. 3. 3)	NH <sub>3</sub>	1,88	0,5
		SO <sub>2</sub>	1	0,33
		NO <sub>x</sub>	0,696	0,33
		HCl	0,87671233	0,5
		aq acide	0,5	1
Ozone troposphérique	POPC (Eq. 3. 4)	SO <sub>2</sub>	0,048	0,33
		NO <sub>x</sub>	0,028	0,33
		CO	0,027	1
		COGNM	0,42	1
		CH <sub>4</sub>	0,007	0,5
		POP	0,021	1
		phénol	0,761	0,5
Toxicité	TP (Eq. 3. 5)	Cadmium	150000	1
		Chrome	3400000	1
		Cuivre	4300	1
		NH <sub>3</sub>	0,1	0,5
		Nickel	35000	1
		Sélénium	48000	1
		Zinc	100	1
		SO <sub>2</sub>	0,31	0,33
		NO <sub>x</sub>	1,2	0,33
		PM10	0,096	1
		HCl	0,5	0,5
		phénol	0,52	0,5
Ecotoxicité	EP (Eq. 3. 5)	Cadmium	2201111	1
		Chrome	45027,7	1
		Cuivre	1770787	1
		Nickel	7502350	1
		Sélénium	30001243	1
		Zinc	135076	1
		phénol	2,9733	0,5

Avec : aq = acquise ; DCO= demande chimique en oxygène ; COGNM= composé organique global non métal ; POP= polluants organiques persistants ; PM10 = poussière de taille inférieure à 10  $\mu$  m.

### **3.1.1.4 Discussion**

Pour un maître d'ouvrage, les indicateurs « entrants » sont les plus faciles à manipuler, ainsi que l'impact des gaz à effet de serre (GWP, Eq. 3.1). Pour le calcul et la comparaison des variantes de tracé, comme l'hypothèse de linéarité est retenue la différence s'obtiendra au niveau de la longueur de chaque tracé. Une autre différence peut apparaître d'une variante à l'autre en lien avec les sites d'approvisionnement des matériaux si des distances de transport paramétrables sont retenues.

## **3.1.2 Effet sur les écosystèmes - Fragmentation des écosystèmes**

### **3.1.2.1 Définition de la fragmentation**

La fragmentation est un processus où l'habitat est divisé en de plus petites zones, elle est caractérisée par la réduction des surfaces totales que l'habitat occupe (Quintana et al., 2010). Dans la plupart des cas, la fragmentation des écosystèmes naturels est due à l'activité humaine. Une des causes principales de la fragmentation des écosystèmes est la construction d'infrastructures routières (Geneletti, 2004). En plus, la route peut affecter la structure et la fonction du territoire car elle crée une barrière au mouvement et à la migration des animaux.

### **3.1.2.2 Expression des indicateurs pour la fragmentation des écosystèmes**

Le calcul de la fragmentation des écosystèmes est complexe car la nature des indicateurs n'est pas comparable à celles de paramètres physiques mesurables. Il n'y a pas beaucoup d'études sur ce type d'indicateurs dans la bibliographie. (Quintana et al., 2010) introduit un paramètre « indice de connectivité » afin d'évaluer la capacité de déplacement entre des secteurs d'habitat avant et après l'insertion de la nouvelle route.

La Figure 3. 5 illustre un scénario de traversée d'écosystème par un projet routier. La Figure 3. 5a selon Geneletti (2004), présente la zone d'écosystème A et B avant l'insertion de la route sur le territoire. La Figure 3. 5b présente la zone d'écosystème A et B après l'insertion de la route sur le territoire. A cause de la nouvelle route, la surface de la zone A est divisée en 2 tâches  $A_1$  et  $A_2$  ayant une superficie  $A_1 + A_2 < A$ .

On entend par viabilité l'existence de conditions de vie favorables d'un écosystème. La viabilité totale des zones  $A_1$  et  $A_2$  est plus faible que celle de la zone A initiale. Cela est expliqué par la fragmentation des zones d'écosystème causée par la route.

Selon des hypothèses de calcul de Geneletti (2004), la fragmentation des écosystèmes se relie à 3 types d'effets et donc d'indicateurs dont le calcul utilise les éléments suivants :

- Aire viable des écosystèmes : cet indicateur est lié à la surface des zones d'habitat avant et après l'insertion d'une nouvelle route (sur la Figure 3. 5b zones  $A_1$  et  $A_2$ ). D'après des observations de terrain, plus l'aire de la zone d'écosystème est grande, plus cette zone est stable. En effet, si l'aire de la zone d'habitat est grande, les animaux ont plus de possibilité de se déplacer vers l'endroit voulu (chercher de la nourriture, de l'eau,...).
- Isolement des écosystèmes : cet indicateur est calculé par la mesure des distances entre des zones d'habitat. A cause de la route, le déplacement habituel des animaux est interrompu. et change évidemment leur vie quotidienne. Pour quelques espèces, cela peut-être cause des disparitions d'animaux car il manque des conditions de vie nécessaires (nourriture, abri,...).

- Perturbation des écosystèmes : cet indicateur correspond à l'impact direct de la route sur les zones d'habitat autour de la route. La route expose les habitats aux bruits, aux pollutions de l'air. L'infrastructure cause des collisions lorsque les animaux traversent la route. La situation peut être améliorée en imposant des passages réservés aux animaux dans les zones d'habitat importantes à préserver. Cela augmente le coût d'investissement du projet.

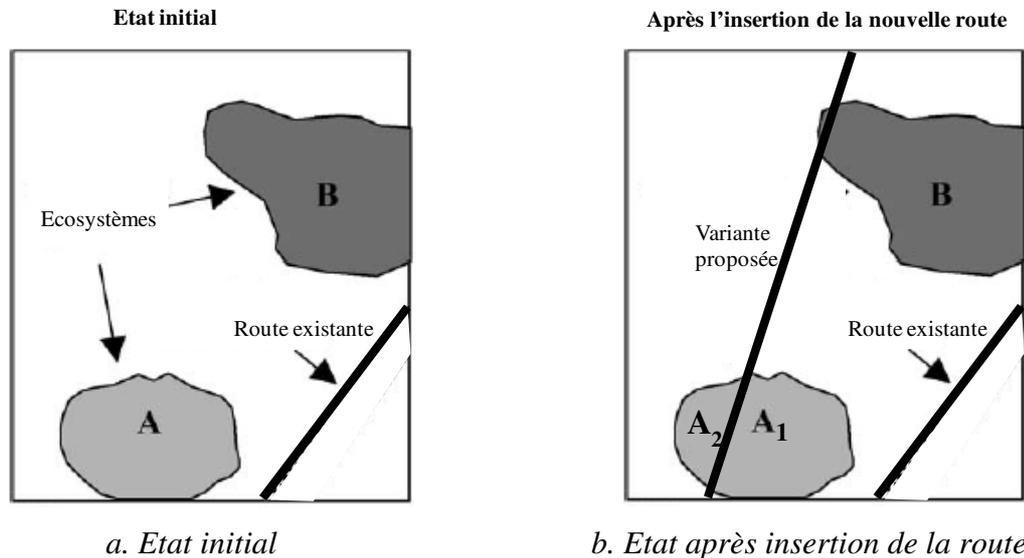


Figure 3.5 Fragmentation des écosystèmes (d'après Geneletti, 2004).

### 3.1.2.3 Pertinence de l'indicateur « fragmentation des écosystèmes » en phase de l'étude d'avant projet sommaire

Du fait que la fragmentation augmente l'isolement des zones d'habitat, réduit leur taille et crée une forte perturbation (Geneletti, 2004), la route est cause de mortalité animale lorsque des animaux se déplacent entre ces zones divisées.

### 3.1.2.4 Formulation et méthode de calcul retenue pour les écosystèmes

L'intérêt de la méthode de calcul de Geneletti (2004) dans ce contexte conduit à l'appliquer pour calculer des indicateurs de fragmentation.

On présente ci-dessous des méthodes de calcul de ces trois indicateurs « aire viable des écosystèmes, isolement des écosystèmes, perturbation des écosystèmes ». Pour ces calculs, on utilise la notion de viabilité qui a le sens contraire de l'impact. La viabilité exprime la capacité des espèces à vivre dans le territoire. Les indicateurs proposés par Geneletti sont calculés d'abord en vue de la viabilité et ils sont convertis ensuite en valeur d'impact.

On considère que l'impact de l'insertion de l'infrastructure dans l'aire d'étude sur la viabilité des écosystèmes s'exprime par la différence des viabilités entre état initial et après l'insertion :

### 3.1.2.5 Aire viable de l'écosystème

#### Présentation du problème

On importe d'abord les données des zones d'urbanisme et des variantes de tracé. Ensuite, en utilisant la fonction « zone tampon » du module Spatial Analyst, on crée des « zones tampon » de 100 m de part et d'autre de l'axe de la route (Figure 3. 6), distance permettant de prendre convenablement en compte les impacts sur l'écosystème aux abords de la route. D'après la Figure 3. 6, la variante 1 (ligne) est la variante d'entrée (codifiée « variante\_1 ») de la fonction. Le résultat fourni par la fonction « zone tampon » codifié « buff\_val1.shp » est l'aire grisée représentée sur la Figure 3. 6.

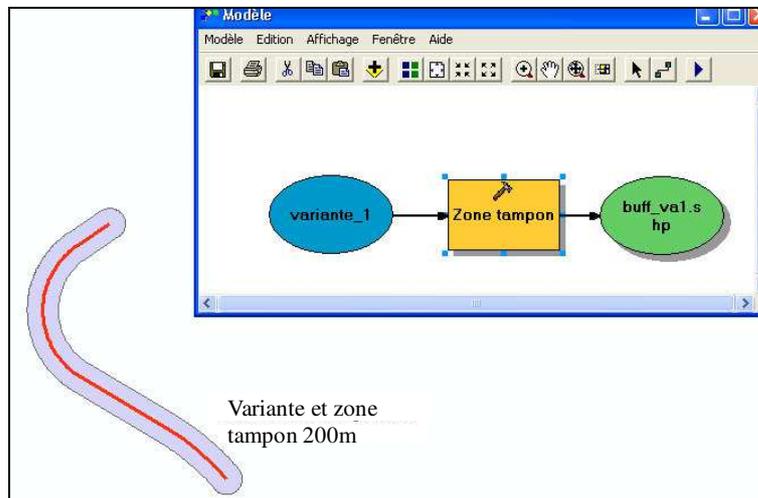


Figure 3. 6 Réalisation des zones « tampon » autour de la nouvelle variante de tracé.

On réalise d'abord le croisement de la zone tampon et de l'écosystème en utilisant le fond de carte disponible dans le cadre du projet. La Figure 3.7 présente quatre écosystèmes présents dans la zone du projet routier, le nombre d'écosystèmes dépend du territoire et de l'aire d'étude d'un projet. L'aire d'étude varie de quelques km<sup>2</sup> à une centaine de km<sup>2</sup>. L'échelle prise d'une carte est du 1/100000 au 1/5000.

Ensuite, on calcule la surface de l'écosystème non occupé par l'infrastructure et sa zone tampon en utilisant la fonction polygone.

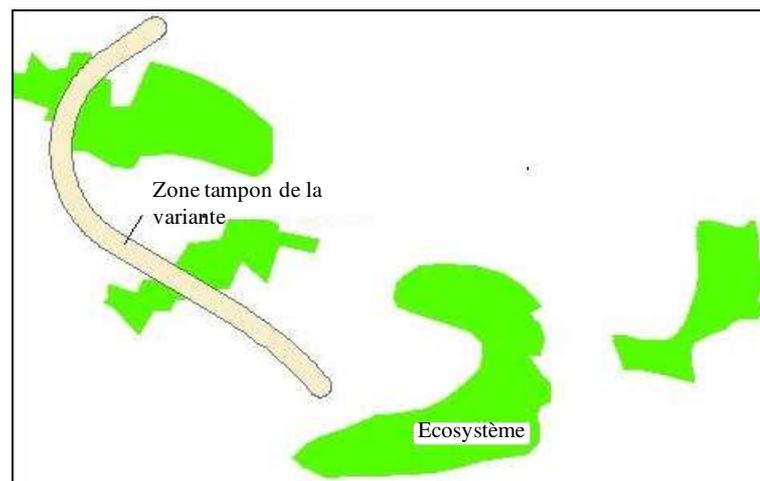


Figure 3.7 Réalisation du croisement entre « zone tampon » de la variante et l'écosystème.

a) Calcul de la surface de l'« Aire viable de l'écosystème »

La Figure 3. 8 montre l'aire viable  $S_v$  de la zone d'écosystème (en supprimant les zones occupées par la route).

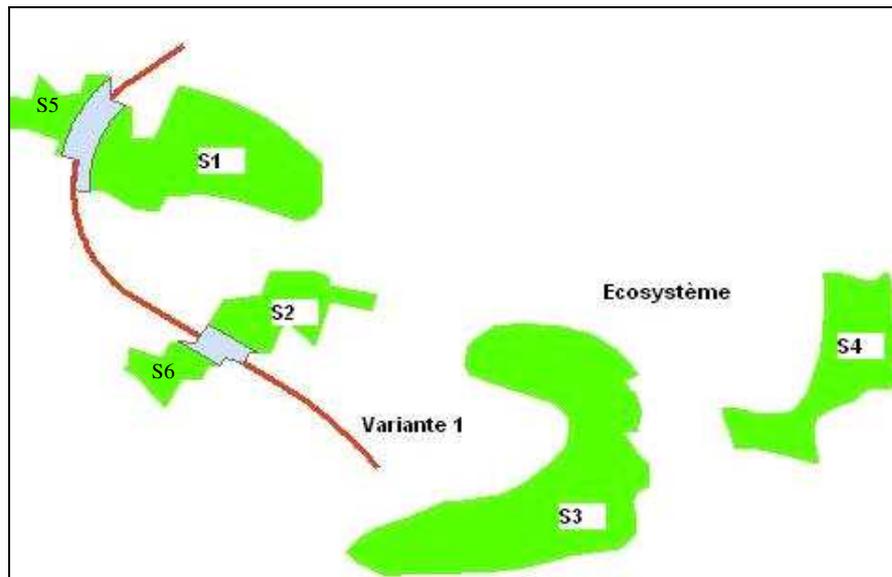


Figure 3. 8 Surfaces restantes des écosystèmes.

b. Calcul de la viabilité unitaire de l'écosystème au sens de l'indicateur « Aire viable de l'écosystème »

On considère que les animaux résident de préférence dans le centre de l'écosystème plutôt qu'à proximité de sa bordure. On se propose par la suite d'appliquer un coefficient de réduction à la valeur d'aire réelle d'écosystème afin de réduire la surface habitable qu'on obtient l'«aire de noyau de l'écosystème».

D'après Geneletti (2004), lorsque l'aire de l'écosystème est réduite (< 4 ha), la viabilité de cet écosystème est égale à 0. Dans la thèse, pour l'écosystème ayant la surface plus grande que 4 ha, on attribuera un coefficient de calcul de l'«aire de noyau de l'écosystème» qui est égal à 0,8. Cette hypothèse sera utilisée pour calculer les 2 autres indicateurs : « Isolement » et « Perturbation » dans les parties suivantes.

D'après Geneletti (2004), il existe une relation non linéaire entre l'aire de noyau de l'écosystème et la viabilité unitaire  $v_i$  de l'écosystème « i » comme l'indique dans la Figure 3. 9. Plus la surface de la zone d'écosystème est grande, plus la valeur de viabilité est grande.

La viabilité de l'aire viable de l'écosystème ( $V_{aire}$ ) est le produit de chaque surface ( $S_1, S_2, S_3, \dots$ ) par leurs viabilités unitaires ( $v_1^{aire}, v_2^{aire}, v_3^{aire}, \dots$ ) obtenues à partir de la Figure 3. 9.

La viabilité ( $V_{aire}$ ) de l'aire viable est donnée par :

$$V_{aire} = 0,8 \times \sum_{i=1}^{Ne} S_i \times v_i^{aire} \quad (Eq. 3. 7)$$

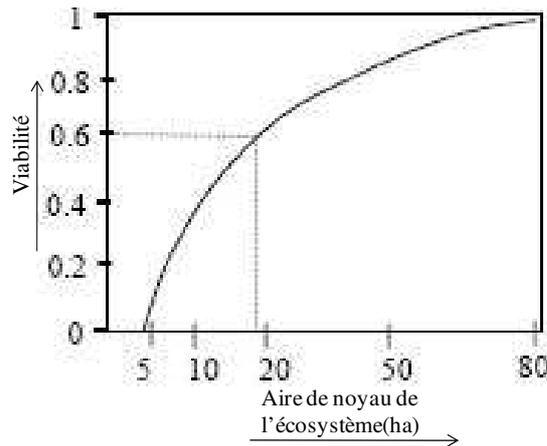


Figure 3.9 Relation entre aire viable de l'écosystème et sa viabilité (d'après Geneletti., 2004).

Pour calculer l'impact de l'écosystème, il faut prendre en compte également le coefficient « rareté ». La rareté est déterminée par le niveau de changement de la zone d'écosystème. On détermine le pourcentage  $p$  (%) de l'écosystème en prenant le rapport de la surface actuelle avec la surface initiale. La surface initiale est la surface de référence quelques années auparavant : 10 ans, 20 ans.... Ce temps dépend du type d'écosystème. La Figure 3.10 montre la détermination de la rareté des écosystèmes grâce au diagramme proposé par Geneletti (2004).

Dans le calcul, la rareté des écosystèmes est estimée par une hypothèse comme suit : la surface de chaque écosystème est réduite de 50% par rapport à son état il y a 10 ans (exemple). Le niveau de rareté pour chaque écosystème est donc  $r_i = 0,42$  d'après le graphique de Geneletti. Cette hypothèse sera utilisée pour calculer les 2 autres indicateurs : « Isolement » et « Perturbation » dans les parties suivantes.

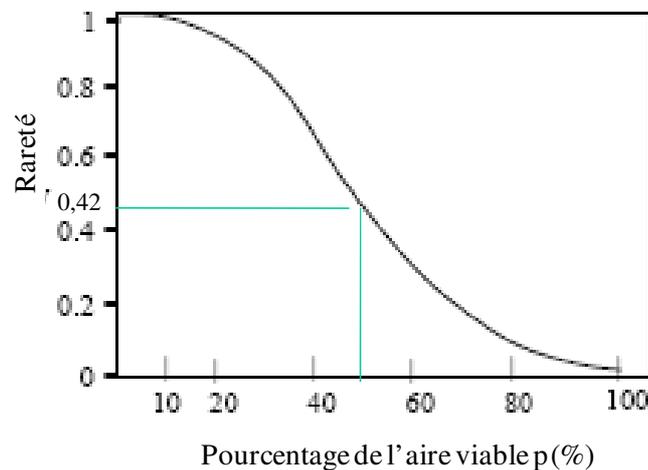


Figure 3.10 Relation entre la rareté et le pourcentage (Geneletti, 2004).

L'impact ( $I$ ) de cet effet est calculé donc par la formule :

$$I_{aire} = 0,42 \times (V_{aire}^{initial} - V_{aire}^{variante}) \quad (Eq. 3. 8)$$

### 3.1.2.6 Isolement des écosystèmes

#### a. Calcul de la longueur d'isolement

D'après Geneletti (2004), on calcule cet indicateur en se basant sur une hypothèse selon laquelle l'animal se déplace d'une zone à une autre en suivant le chemin le plus court. La Figure 3.11 indique la distance d'isolement «  $d_{23}$  » entre des écosystèmes 2 et 3. A cause de la route, l'écosystème 1 devient isolé car il n'existe plus de liaison «  $d_{12}$  » ni «  $d_{13}$  ».

Les données utilisées sont celles des écosystèmes du territoire et de la route (réseau actuel et variantes de tracé). Le calcul est réalisé manuellement dans ArcGIS en relevant avec la souris d'éloignement des écosystèmes.

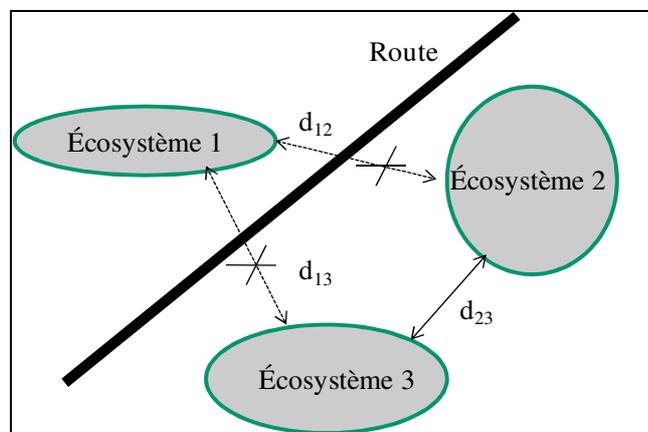


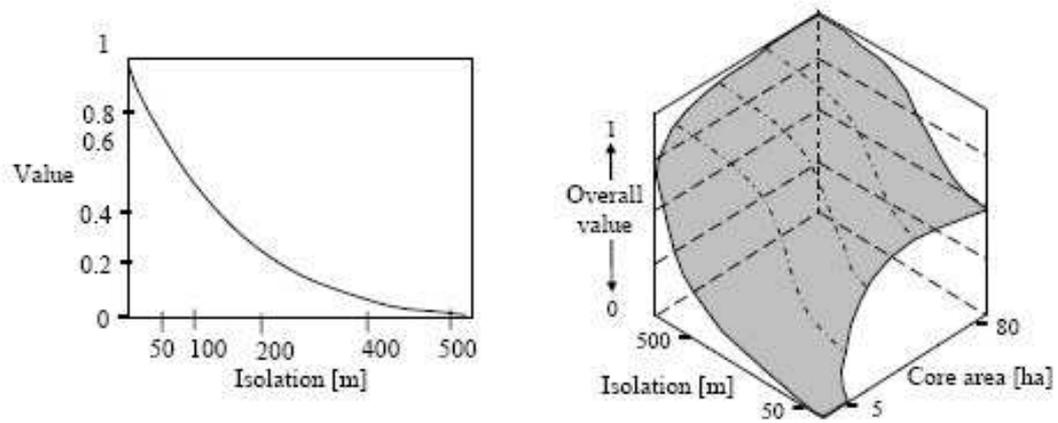
Figure 3.11 Distance d'isolement des zones d'écosystème.

#### b. Calcul de la viabilité unitaire de l'écosystème au sens de l'indicateur « Isolement de l'écosystème »

La Figure 3.12a présente la détermination de cet indicateur grâce au diagramme proposé par Geneletti (2004). Ce diagramme donne à partir de la distance d'isolement (en mètre) une correspondance avec une valeur de viabilité. Le maximum étant à 1 pour une distance de 500 m.

La Figure 3.12b montre que la courbe d'isolement en fonction de la distance dépend également de la surface de l'écosystème.

La viabilité de l'écosystème ( $V_{iso}$ ) est le produit de chaque surface ( $S_1, S_2, S_3, \dots$ ) par la viabilité unitaire ( $v_1^{iso}, v_2^{iso}, v_3^{iso}, \dots$ ) correspondante obtenue à partir de la Figure 3.12a.



a)

b)

Figure 3.12 Relation entre isolement et viabilité (Geneletti., 2004).

La viabilité de l'isolement est donné par :

$$V_{iso} = 0,8 \sum_{i=1}^{Ne} S_i \times v_i^{iso} \quad (Eq. 3. 9)$$

L'impact de cet effet est calculé par la formule :

$$I_{iso} = 0,42 \times (V_{iso}^{initial} - V_{iso}^{variante}) \quad (Eq. 3. 10)$$

### 3.1.2.7 Perturbation des écosystèmes

#### a. Calcul de la longueur de perturbation

En premier lieu, on réalise une zone de tampon de 120 m de part et d'autre de la route pour déterminer la zone d'emprise de la route (Figure 3.13). Cette distance peut être adaptée en fonction de la classe de la route (niveau, catégorie) de la route.

Ensuite, on détermine le centre de gravité G de chaque zone d'écosystème. On calcule la distance minimum de ce point au bord de la route. La Figure 3.13 présente la longueur de perturbation « d » entre la route et la zone d'écosystème.

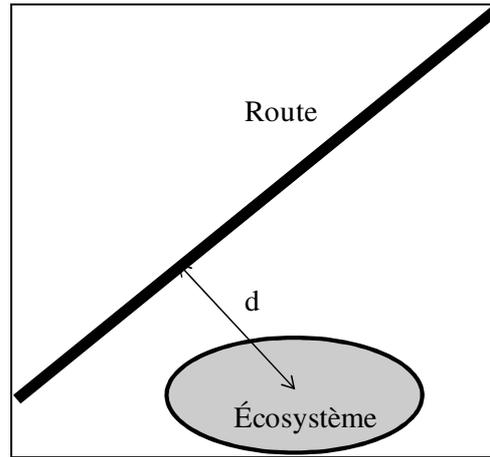


Figure 3.13 Distance de perturbation.

b. Calcul de la viabilité unitaire de l'écosystème au sens de l'indicateur « Perturbation des écosystèmes »

Quant à la perturbation, la viabilité est déterminée grâce au diagramme proposé par Geneletti (2004) (Figure 3.14). A chaque distance de perturbation, on calcule la viabilité de la zone d'écosystème. Plus la longueur de perturbation est grande, plus la valeur de viabilité est grande. Le calcul de viabilité est effectué avant et après l'insertion de la nouvelle route. La Figure 3.14 montre que la courbe de perturbation varie en fonction de la distance de perturbation.

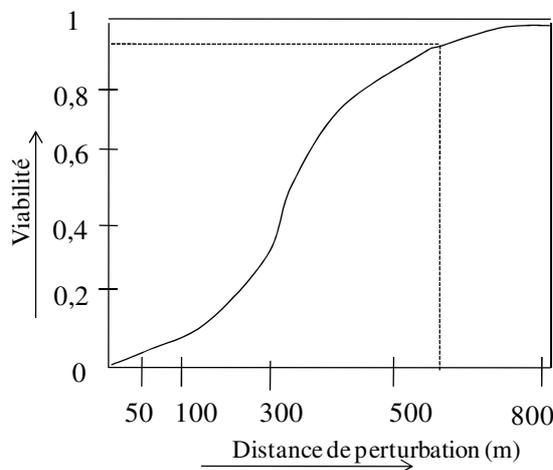


Figure 3.14 Relation entre la longueur de perturbation et la viabilité (Geneletti, 2004).

La viabilité de la perturbation de l'écosystème ( $V_{per}$ ) est le produit de chaque surface ( $S_1, S_2, S_3, \dots$ ) par la viabilité unitaire ( $v_1^{per}, v_2^{per}, v_3^{per}, \dots$ ) correspondante obtenu à partir de la Figure 3.14a.

L'isolement est donné par :

$$V_{per} = 0,8 \sum_{i=1}^{Ne} S_i \times v_1^{per} \quad (Eq. 3. 11)$$

On considère que l'impact de l'insertion de l'infrastructure dans l'aire d'étude sur la viabilité des écosystèmes s'exprime par la différence des viabilités entre état initial et après l'insertion :

L'impact de cet effet est calculé par la formule :

$$I_{per} = 0,42 \times (V_{per}^{initial} - V_{per}^{variante}) \quad (Eq. 3. 12)$$

### **3.1.2.8 Calcul de l'impact total de la fragmentation des écosystèmes**

Après le calcul de la viabilité pour les 3 types d'indicateurs au-dessus, on calcule l'impact de la fragmentation des écosystèmes de la manière suivante.

$$I_F = I_{aire} + I_{iso} + I_{per} \quad (Eq. 3. 13)$$

## 3.2 Indicateurs ponctuels

Un seul indicateur est abordé dans cette partie, on le nomme « effets sur la sécurité et circulation-crédation des intersections ».

### 3.2.1 Effets sur la sécurité et circulation - création d'intersections

#### 3.2.1.1 Définition

Le coût de construction des carrefours est élevé. Le nombre de carrefours est un paramètre important dans le calcul du coût du projet et la comparaison de nouvelles variantes doit le prendre en compte. C'est pour cette raison notamment que le nombre de carrefours est comptabilisé dans l'évaluation du développement durable des variantes de projet. De plus, l'insertion d'une nouvelle variante de tracé dans le territoire peut faire apparaître des points de non sécurité. Enfin, le nombre de carrefour fait augmenter le temps de parcours des véhicules dans le territoire.

Ainsi le nombre de carrefours correspond au calcul de 3 indicateurs différents : un indicateur coût, un indicateur sécurité, un indicateur temps perdu.

Le nombre de carrefours déduit ces 3 indicateurs. Par exemple : plus le nombre de carrefours est grand, plus la sécurité de la route n'est pas assurée. Chaque carrefour nécessite un coût de construction, cela permet de calculer le coût de construction totale de ces carrefours. Lorsqu'un véhicule traverse un carrefour, il perd un temps, on peut calculer donc le temps perdu totale sur le réseau causé par les carrefours.

Le principe de calcul de cet indicateur peut être appliqué à d'autres indicateurs de ce type comme : le nombre de croisement entre la nouvelle variante et le réseau ferré ou des cours d'eau.

#### 3.2.1.2 Expression d'indicateur « nombre de carrefours »

L'indicateur « nombre de carrefours » ( $N_C$ ) est calculé par le nombre d'intersections entre une nouvelle variante de tracé et le réseau routier existant.

Cet indicateur est calculé directement par une fonction disponible dans ArcGIS qui effectue un comptage.

#### 3.2.1.3 Pertinence de cet indicateur en phase d'avant projet sommaire

Si les variantes étudiées dans une aire d'étude de dimensions 10 km × 10 km se distinguent par des nombres de carrefours différents et permettant de classer de manière monotone (simple) selon le nombre de, alors la pertinence sera considérée comme acquise.

#### 3.2.1.4 Formulation et méthode de calcul retenue

La méthode de calcul est graphique et s'effectue à l'écran.

On importe d'abord le réseau routier actuel et la nouvelle variante de tracé comme montré en Figure 3.15. Ensuite, en utilisant la fonction « intersecter » du module Spatial Analyst, on crée des carrefours. D'après la Figure 3.15, la variante (ligne sombre) et le réseau actuel (lignes claires) sont les données d'entrée de la fonction.

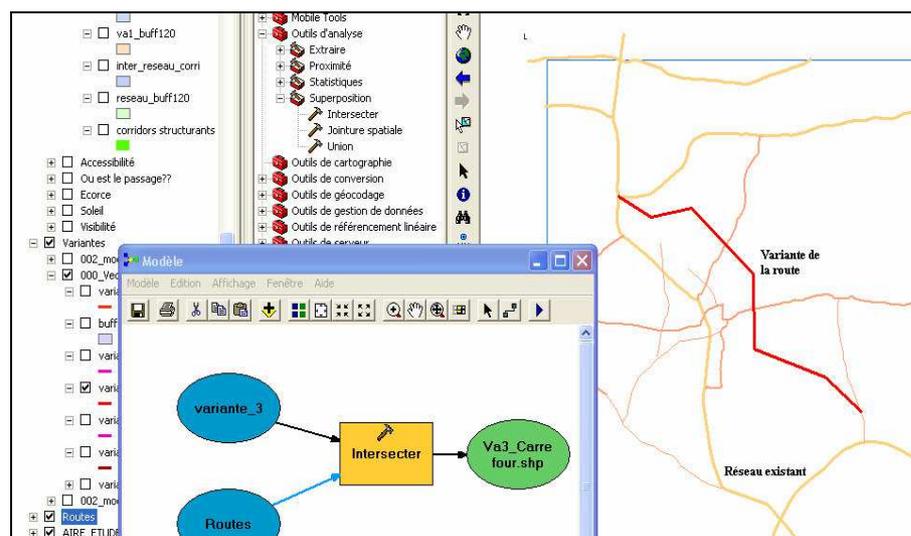


Figure 3.15 Intersection des lignes pour créer des carrefours.

Le résultat fourni par la fonction « intersecter » codifié « Va3\_Carre four.shp » en Figure 3.16 est représenté par des points de carrefours (points ronds) tels que sur la Figure 3.16. En cliquant droit sur « Va3\_Carre four.shp », on compte le nombre de carrefours.

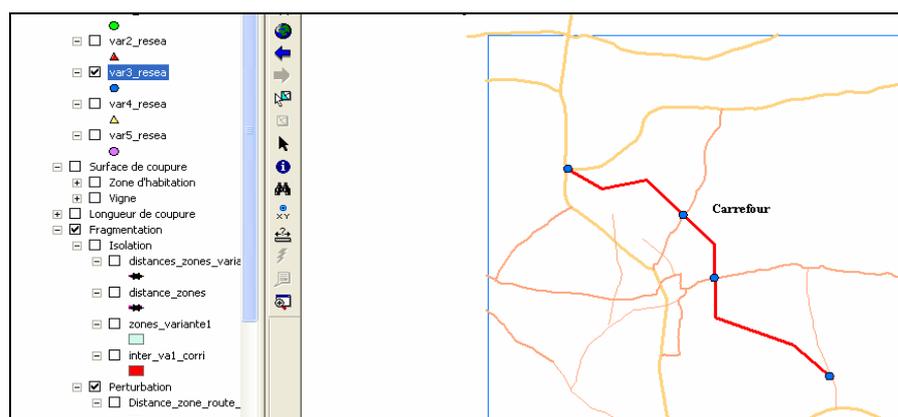


Figure 3.16 Nombre de carrefours créée par la nouvelle route.

### 3.3 Indicateurs segments/linéiques

#### 3.3.1 Effets sur le patrimoine bâti, sur le milieu naturel et les espaces disponibles

Le but ici est de développer des modèles de calcul des longueurs de coupure car cet indicateur est utilisé pour résoudre des objectifs différents selon la nature, sans différencier le type de zone à ce stade :

- Protection et prévention de la zone sensible comme : effet sur les aires viticoles et agricoles. La route traversant des zones agricoles cause des pertes de surface exploitable et des difficultés à exploiter les parcelles et récolter les produits.
- Limitation des effets visuels. L'insertion de l'infrastructure dans le grand paysage est telle que l'apparition de la route détruit l'esthétique de la zone de paysage qu'elle traverse.
- Gestion des risques (inondation, incendie, mouvement de terrain, tempête). Plus la route est proche et se trouve dans ces zones de risques, plus le risque potentiel pour la route augmente. Il s'agit dans ce cas plutôt de la sécurité des usagers.
- Maintien du cadre de vie et des équipements de loisirs et d'accueil du public. La route traversant ces zones engendre la perte de l'espace de loisir des habitants. Elle crée des nuisances (qui sont traitées par d'autres indicateurs).

##### 3.3.1.1 Définition

On considère le cas d'une route qui traverse des zones sensibles ou des périmètres de protection de ces zones (Figure 3.17). L'indicateur calculé dans ce cas est la longueur de coupure des zones sensibles par la route. Une variante est considérée comme favorable si elle ne coupe pas beaucoup de zones sensibles. La Figure 3.17 répertorie différents types de zones sensibles.

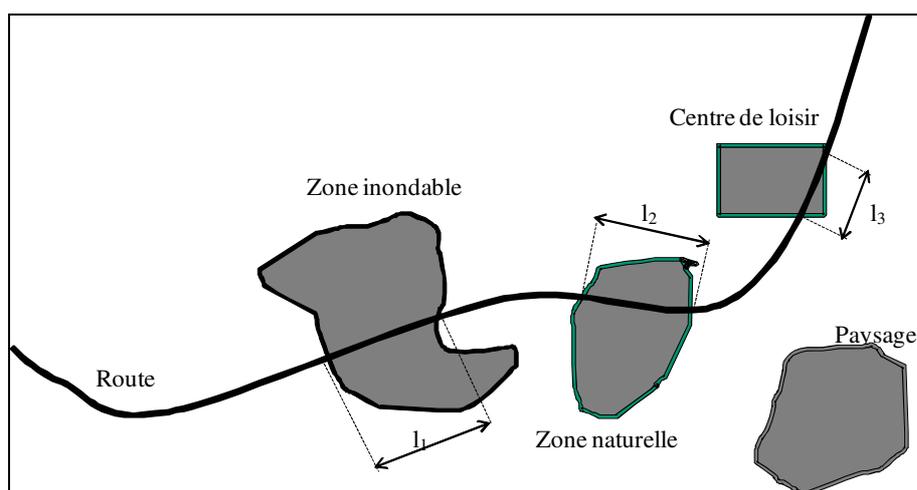


Figure 3.17 Routes et zones sensibles types .

##### 3.3.1.2 Expression de l'indicateur « longueur de coupure »

Cet indicateur est simple et facile à calculer. Il peut être calculé automatiquement grâce à ArcGIS. Cet indicateur n'est pas beaucoup utilisé dans les articles scientifiques, mais on

l'utilise souvent dans les rapports d'évaluation des projets d'infrastructures pour classer les variantes.

La formule de calcul de cet indicateur est :

$$L_C = \sum_{k=1}^N L_k \times I_k \quad (\text{Eq. 3. 14})$$

avec

$I_k$  : niveau d'impact de chaque zone sensible coupée (sans unité).  $I_k=1, 2, \dots$  en dépendant des notes des spécialistes ou acteurs du projet routier ;

$L_k$  : longueur de coupure dans chaque zone sensible par la route (m) ;

$L_C$  : indicateur « longueur de coupure » total (m).

### **3.3.1.3 Pertinence de cet indicateur en phase de l'étude d'avant projet sommaire**

La longueur de coupure  $L_C$  (km) est présentée sur les cartes avec ArcGIS. Cet indicateur est donc compréhensible et explicite pour les clients directement concernés par la traversée des zones notamment de loisirs.

### **3.3.1.4 Formulation et méthode de calcul retenue**

Cet indicateur est calculé par la fonction « intersecter » dans ArcGIS.

Afin d'utiliser cette fonction, on importe d'abord des données comme des zones sensibles (patrimoines, aire viticole,..), des variantes de tracé. Ces données sont celles utilisées dans l'étude préliminaire d'avant projet sommaire. Ensuite, en utilisant la fonction « intersecter » du module Spatial Analyst, et on crée ainsi des lignes de coupure.

La Figure 3.18 illustre la méthode d'ArcGIS pour calculer cet indicateur.

D'après la Figure 3.18, la variante de tracé (ligne en trait) et les zones sensibles (des surfaces sombres) sont les données d'entrée de la fonction.

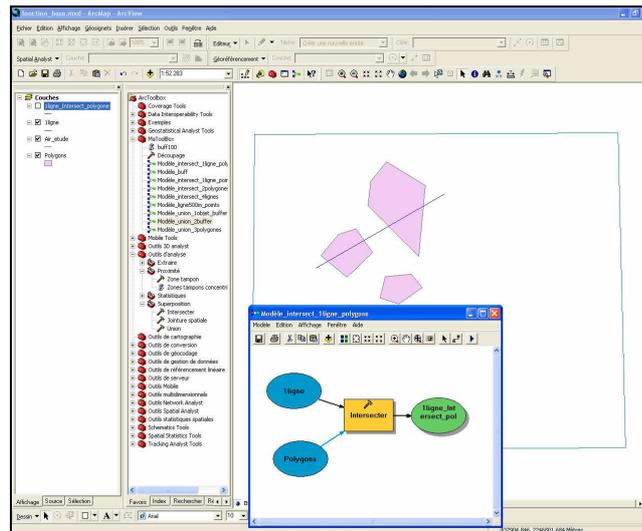


Figure 3.18 Intersection entre une ligne avec des zones sensibles.

Le résultat fourni par la fonction « intersecter » codifié « l1ligne\_intersect\_pol » sont des lignes de coupure représentées sur la Figure 3.19. En effectuant un clic droit sur « l1ligne\_intersect\_pol », on compte la longueur de coupure.

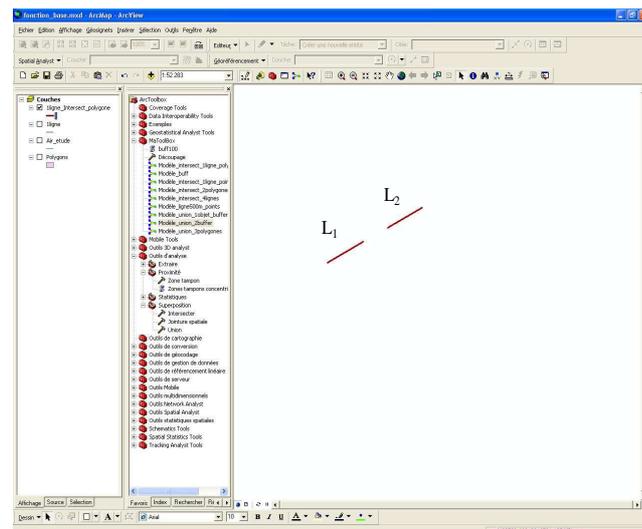


Figure 3.19 Coupures d'un linéaire dans les zones sensibles.

### 3.3.2 Nuisance sonore - longueur de façade impactée - habitants exposés

#### 3.3.2.1 Définition de la nuisance sonore

Le bruit engendré par la route cause une détérioration de la qualité de vie des habitants : la qualité du sommeil est diminuée, le repos après une journée de travail devient impossible, et la présence d'une route près de bureaux peut empêcher les personnes y travaillant de se concentrer.

C'est pourquoi l'insertion d'une variante de tracé sur le territoire doit prendre en compte la nuisance sonore causée par elle-même. Si la variante de tracé expose un nombre moindre d'habitants, cette variante est plus favorable.

Le calcul peut prendre en compte aussi les zones de futur habitat définies dans les documents d'urbanisme (PLU...). En effet, ne prendre en compte que l'existant peut faire oublier de grandes zones d'aménagement futur. C'est un problème de cohérence du projet d'infrastructure avec l'aménagement du territoire.

Les indicateurs retenus dans les textes d'application de la loi Bruit sont :  $L_{Aeq}$  (6h-22h) pour la période diurne et  $L_{Aeq}$  (22h-6h) pour la période nocturne, définissent des seuils d'intervention au-delà desquels la probabilité de gêne (en fonction du type de locaux) n'est pas considérée comme acceptable (METLDR, 1998).

En ce qui concerne les projets d'infrastructures nouvelles ou de transformation d'infrastructures existantes, les textes d'application de la loi Bruit du 31 décembre 1992 ; décret du 9 janvier 1995 et arrêté du 5 mai 1995, définissent les modalités de prise en compte du bruit et les niveaux sonores admissibles. Le Tableau 3.3 résume les niveaux maximaux admissibles en façade des bâtiments pour la contribution des projets d'infrastructures nouvelles (METLDR, 1998).

Tableau 3.3 Niveaux maximaux admissibles en façade des bâtiments (SETRA, 2009).

Usage et nature des locaux	$L_{Aeq}$ (6h-22h)	$L_{Aeq}$ (22h-6h)
Etablissement de santé	60 dB(A)	55 dB(A)
Enseignement	60 dB(A)	
Logements en zone peu bruyante	60 dB(A)	55 dB(A)
Autres logements	60 dB(A)	60 dB(A)
Activités non bruyantes (zones peu bruyante)	65 dB(A)	

### 3.3.2.2 Expression des indicateurs « nuisance sonore » de la littérature

Deux types de niveaux de pression sonore sont utilisés en bruit des transports : le niveau maximal utilisé par exemple pour caractériser le bruit au passage d'un véhicule, et le niveau équivalent utilisé pour caractériser par exemple le bruit du trafic. Un niveau sonore  $L$  en décibel est défini par la formule (SETRA, 2009) :

$$L = 10 \log \frac{p_m^2}{p_0^2} \quad (\text{Eq. 3. 15})$$

avec :

$p_m$  : moyenne de la pression quadratique

$p_0$  : pression de référence  $p_0 = 20 \mu \text{ Pa}$  ( $\text{N/m}^2$ )

Dans tous les cas, les nuisances sont principalement une question d'intensité, de durée et de contenu spectral du bruit. Ainsi, la valeur du niveau sonore à un instant donné  $t$  ne peut pas être représentative de l'exposition véritable d'un individu au bruit. Il vaut donc mieux évaluer l'énergie sonore totale reçue pendant un temps donnée  $T_{exp}$ , fournit une énergie moyenne (Potel et Bruneau, 2006) :

$$L_{eq} = 10 \lg \left( \frac{E}{T_{exp}} \right) \quad (Eq. 3. 16)$$

Le bruit est également mesuré par le calcul du niveau sonore L instantané :

$$L_{eq} = 10 \lg_{10} \left( \frac{1}{T_{exp}} \int_0^{T_{exp}} 10^{L/10} dt \right) \quad (Eq. 3. 17)$$

D'après Gauvreau (2007), en considérant le niveau sonore diurne et nocturne, le niveau sonore est calculé par la formule :

$$L_{DN} = 10 \cdot \text{Log} \frac{1}{24} \left[ 15 \int_7^{22} 10^{L_A/10} dt + 9 \int_{22}^7 10^{(L_A+10)/10} dt \right] \quad (Eq. 3. 18)$$

En plus, d'après Gauvreau (2007), en considérant le niveau sonore du jour, du soir et de la nuit, le niveau sonore est calculé par la formule :

$$L_{DEN} = 10 \cdot \text{Log} \frac{1}{24} \left[ 12 \int_6^{18} 10^{L_A/10} dt + 4 \int_{18}^{22} 10^{(L_A+5)/10} dt + 8 \int_{22}^6 10^{(L_A+10)/10} dt \right] \quad (Eq. 3. 19)$$

Parmi ces indicateurs au-dessus, l'indicateur « énergétique » exprimé en décibel (dBA) est le plus utilisé dans la pratique. L'équation (Eq. 3. 18) est retenue pour le calcul de l'indicateur « nuisance sonore ».

### 3.3.2.3 Pertinence de l'indicateur « longueurs de façades exposées aux nuisances sonores »

Une carte d'isophone permet de représenter le niveau sonore autour les axes du réseau routier et sur le territoire proche. Une telle carte donne aux acteurs une vue d'ensemble de la propagation sonore engendrée par la route. Elle est donc intéressante du point de vue de l'évaluation.

De plus, le traitement de la carte d'isophone peut permettre de répondre aux questions :

- combien de maisons se situent dans une zone de nuisance sonore de référence ?
- combien d'habitants sont exposés aux nuisances sonores ?

L'indicateur « longueurs de façades exposées aux nuisances sonores » est donc un critère important dans l'évaluation d'une variante de tracé et il aide les acteurs à choisir la variante optimale.

### 3.3.2.4 Formulation et méthode de calcul retenue

#### Calcul du $L_{Aeq}$

Aujourd'hui, il y a des logiciels de modélisation de l'émission du bruit et de sa propagation sur le territoire. On peut citer des logiciels qui permettent de tracer des cartes d'isophones comme Drone (Bhaskar et al., 2007), Soundplan (Farçaç et Sivertun, 2010).

Ces logiciels permettent d'intégrer leurs résultats dans ArcGIS (Hamed et Effat, 2007 ; Jha et Kang, 2009, Pamanikabud et Tansatcha, 2003, Lee et al., 2008...). Cela favorise le traitement des résultats afin de comparer des variantes de tracé.

Dans le cadre de la thèse, on utilise le logiciel Soundplan pour modéliser le territoire et quantifier la nuisance sonore. Dans ce logiciel sont intégrés plusieurs modèles, normes et méthodes de calcul. Parmi ces modèles, le modèle de calcul NMPB-Routes-2008 (SETRA, 2009) est largement utilisé.

La Figure 3.21 présente un organigramme général de la NMPB- 08, pour un ensemble de routes et un récepteur.

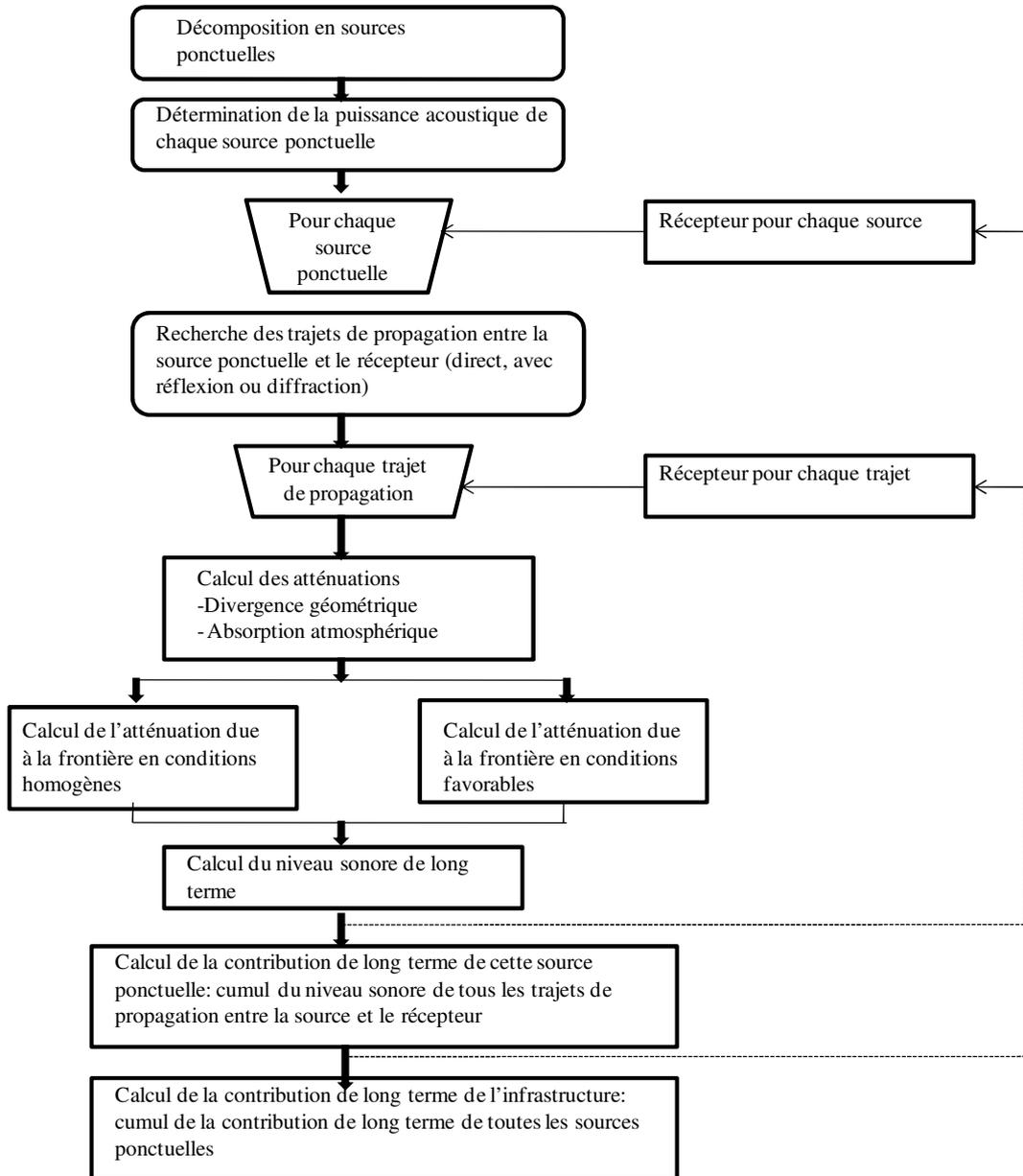


Figure 3.20 Organigramme de la NMPB-08, pour un ensemble de routes et un récepteur (d'après SETRA, 2009).

Ce logiciel est utilisé par le bureau d'étude SCE. Il se compose des fonctions graphiques (création, stockage, traitement). Il permet de calculer des données en 3 dimensions et les résultats de calcul sont des courbes d'isophone propagées spatialement sur le territoire.

La Figure 3.21 récapitule l'organigramme de calcul des courbes d'isophones en utilisant le logiciel Soundplan :

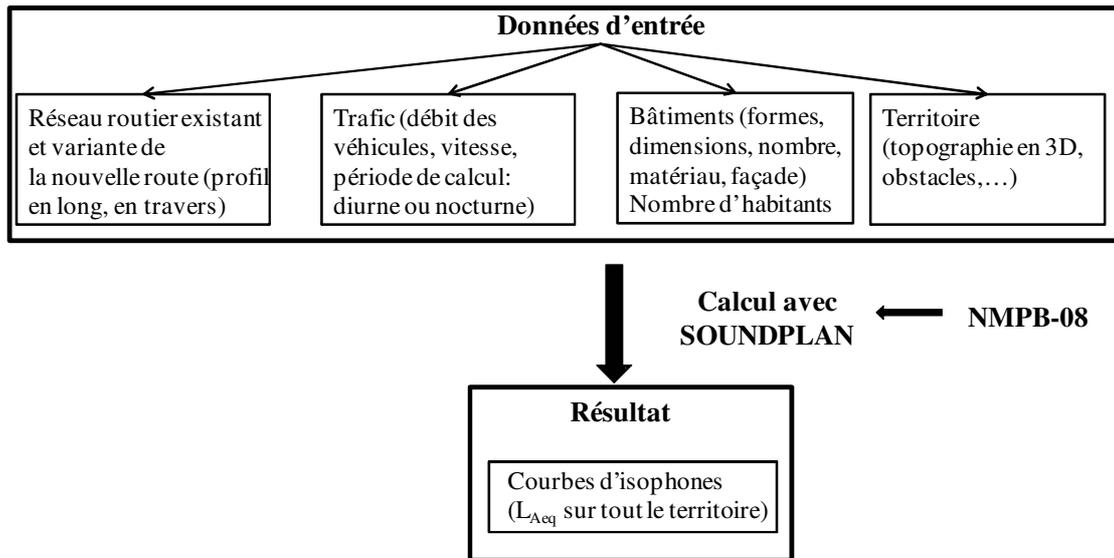


Figure 3.21 Organigramme de calcul de la nuisance sonore par le logiciel Soundplan .

Dans ces calculs, on modélise du territoire qui se compose de : route (profil en long, profil en travers) ; bâtiments (hauteurs, surfaces) ; topographie du terrain.

On s'intéresse au niveau sonore à la hauteur  $H = 3$  m (ou 4 m) correspondant à la hauteur du 1<sup>er</sup> étage des bâtiments comme montré en Figure 3.22.

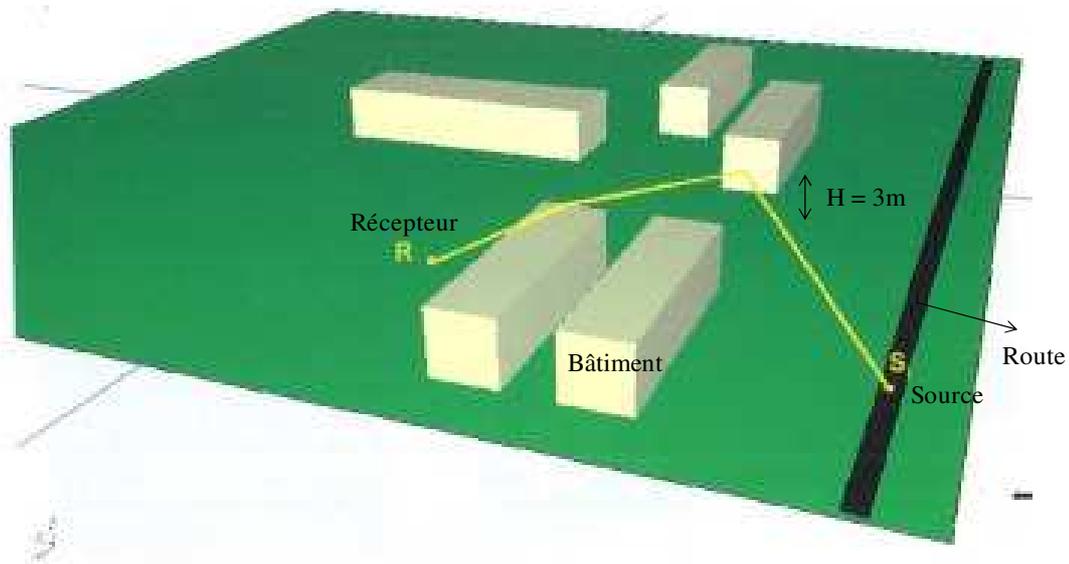


Figure 3.22 Hauteur de mesure de la nuisance sonore

La Figure 3.23 présente des courbes d'isophone dans le cas de 4 routes dans l'aire d'étude. Ce sont les sorties graphiques 2D du logiciel Soundplan. Une courbe d'isophone se constitue des points ayant la même valeur  $L_{Aeq}$ . Sur la Figure 3.23, sur l'axe de la route et à côté de la route, la nuisance sonore est élevée et est caractérisée par les couleurs sombres. Plus loin de la route, la nuisance sonore diminue. On présente la zone admissible (seuil) sur ces cartes. Ce sont des zones d'isophones ayant des niveaux d'exposition de valeurs  $>50$  dB(A).

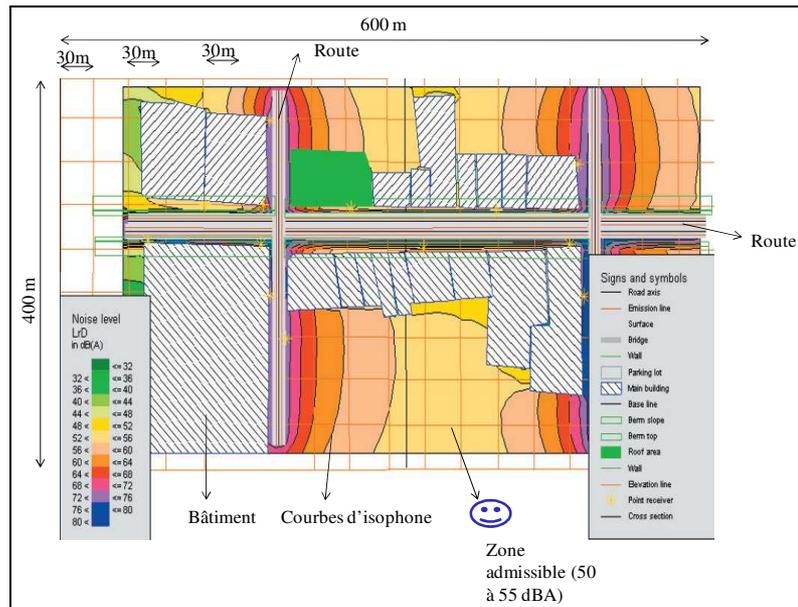


Figure 3.23 Courbes d'isophones, cas avec plusieurs routes  
(www.soundplan.webcentral.com).

Pour traiter des courbes d'isophone calculées par le logiciel Soundplan, on propose de nouveaux indicateurs permettant d'évaluer plus clairement des variantes de tracé comme suivant :

Indicateur « longueur de façade impacté »

La Figure 3.24 montre un résultat de calcul avec Soundplan qui présente pour expliquer le principe de calcul les longueurs de façade des bâtiments exposés au niveau sonore admissible dans l'intervalle [55 dB(A); 60 dB(A)]. Ce sont des longueurs  $l_1$ ;  $l_2$ ;  $l_3$ ...représentées sur la Figure 3.24.

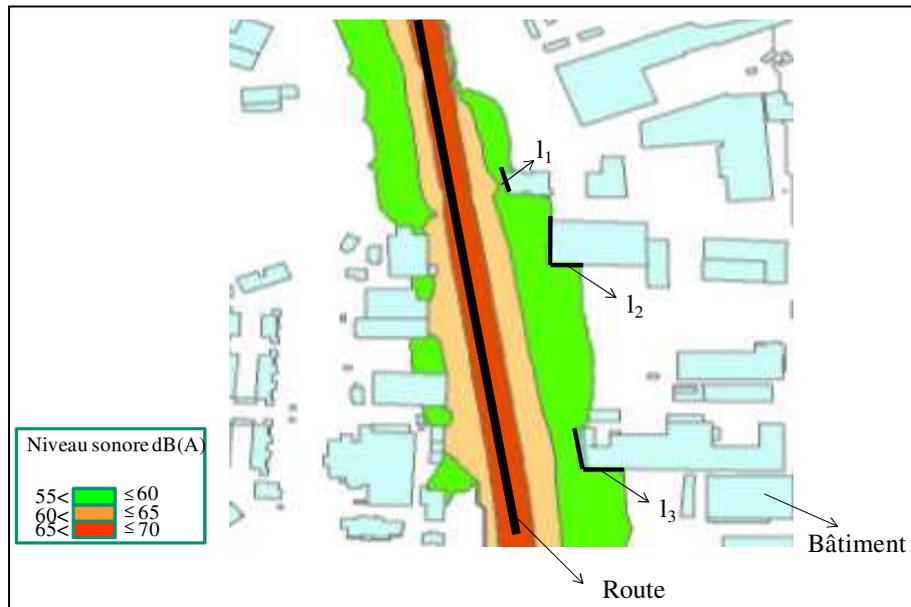


Figure 3.24 Longueurs de façade exposée au niveau sonore admissible (tracée avec ArcGIS pour 3 intervalles).

De plus, dans la modélisation par SoundPlan, des bâtiments sont considérés comme des murs antibruit, il n'y a pas de croisement entre des courbes de niveau et les bâtiments.

La Figure 3. 25 décrit la méthode de calcul de la longueur de façade d'un bâtiment : pour calculer la longueur de la façade des bâtiments soumise à un niveau sonore, on va créer des zones tampons de part et d'autre des bâtiments de 0,1 m de chaque côté afin de calculer l'intersection des bâtiments avec les courbes d'isophones. On obtient la surface d'intersection  $S_k$  (m<sup>2</sup>).

La valeur  $l_k$  est calculée par la formule :

$$l_k = 10 \times S_k \quad (\text{Eq. 3. 20})$$

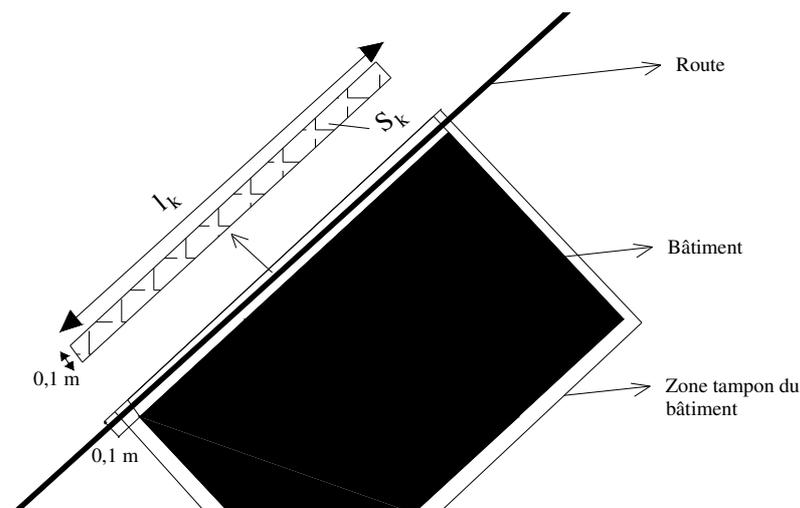


Figure 3. 25 Schéma de méthode de calcul de la longueur de façade.

On a la formule de calcul de cet indicateur :

$$L_F = \sum_{k=1}^{N_f} l_k \quad (\text{Eq. 3. 21})$$

avec :

- $L_F$  : longueur de façade totale exposée aux nuisances sonores (m) ;
- $l_k$  : longueur de façade exposé des bâtiments dans la zone sonore admissible (m) ;
- $N_f$  : nombre de bâtiments dans les zones de croisement.

La variante ayant  $L_F$  minimale présente une variante de moindre impact des nuisances sonores.

Ces longueurs sont indicées  $l_k$  de manière générale.

La Figure 3.26 présente le résultat de calcul des longueurs impactées des bâtiments dans la zone d'isophone. La fonction statistique donne la longueur  $L_F$  totale. Chaque ligne de ce tableau décrit chaque valeur  $l_k$ .

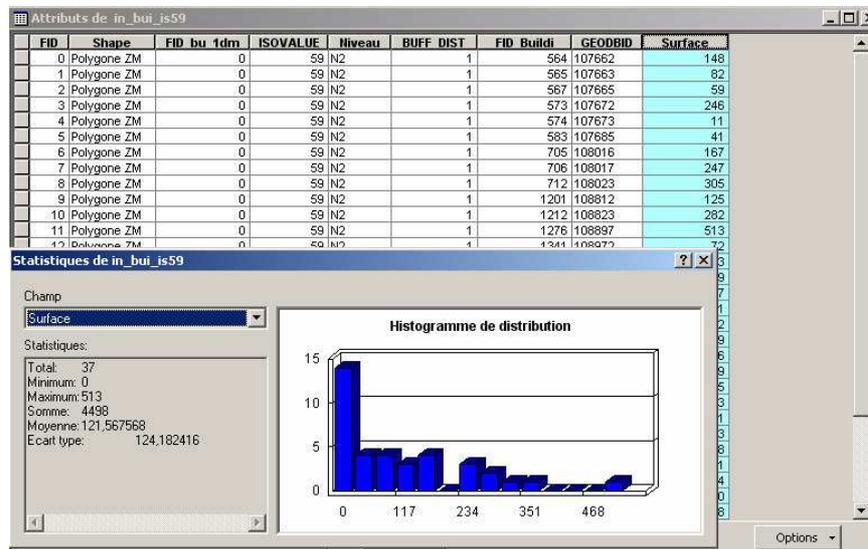


Figure 3.26 Résultat de calcul de la longueur impactée dans ArcGIS.

Dans le cas où on veut prendre en compte plusieurs niveaux sonores dans l'évaluation d'une variante, par exemple, on considère tous les courbes d'isophone ayant le niveau sonore supérieure à 55 dB(A), on suppose obtenir le Tableau 3.4 de synthèse comme suit :

Tableau 3.4 Longueur de façade aux nuisances sonores.

Niveau sonore (dBA)	55-60	60-65	65-70	70-75
Longueur de façade impactée $L_{i-j}$ (m)	35	20	10	5

avec

- $L_{i-j}$  : Longueur de façade exposée aux nuisances sonores entre la courbe d'isophone  $i$  (dBA) et  $j$  (dBA). Cette paramètre est calculée en se basant l'équation (Eq. 3. 21)

La formule de calcul de cet indicateur s'exprime alors :

$$L_F = \sum k_{i-j} L_{i-j} \quad (\text{Eq. 3. 22})$$

avec :

$L_F$  : Longueur de façade totale exposée aux nuisances sonores (m) ;

$k_{i-j}$  : Coefficients de prise en compte de l'importance de différents niveaux sonores dont d'utilité peut être discutée avec des experts en phase projet.

Indicateur « nombre d'habitants exposés à un niveau sonore de référence »

On s'intéresse ici au nombre d'habitants exposés à un niveau sonore de référence pour les variantes de tracé différentes en lien avec l'évaluation de la longueur de façade impactée selon le principe exposé en Figure 3.27.

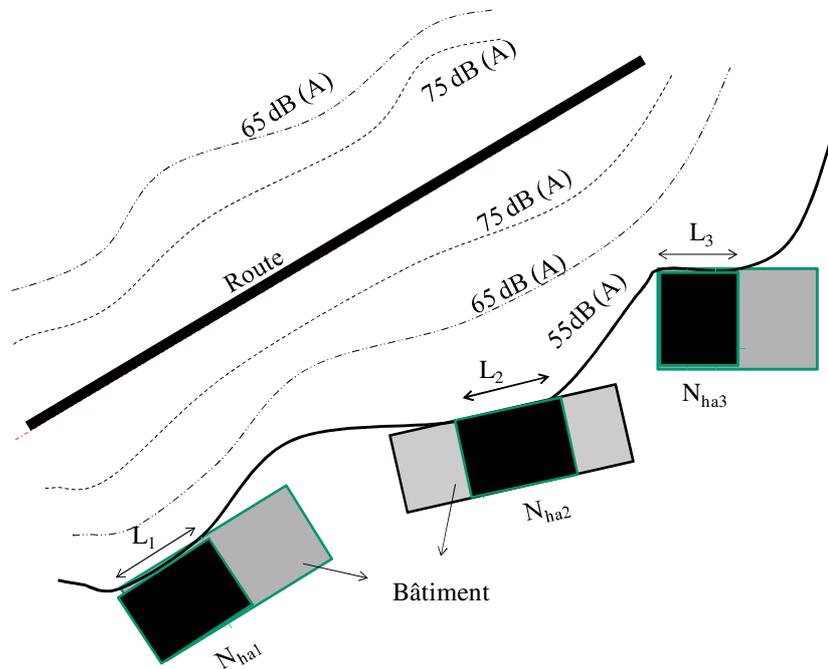


Figure 3.27 Zone d'habitat exposé aux nuisances sonores par bâtiment.

Pour cela, on prend d'abord les longueurs de contact calculées précédemment ( $L_1, L_2, \dots$ ). Correspondant à chaque zone  $L_i$  calculée, on compte ensuite le nombre d'appartements et nombre de résidents. La Figure 3.27 présente le nombre d'habitants  $N_1, N_2, N_3$  subissant cette nuisance sonore.

Si on prend en compte l'influence de différents types de bâtiment, on introduit des coefficients dans le calcul. Ces coefficients expriment les importances des niveaux sonores.

L'impact total de la route dans ce cas :

$$I_{Ha} = \sum_{i=1}^{Nb} k_i \times N_i \quad (\text{Eq. 3. 23})$$

avec :

$I_{Ha}$  : Impact des nuisances sonores aux habitants (sans unité) ;

$k_i$  : Coefficient dépendant du type de bâtiments (maison, entreprise, école, hôpital,...). Les bâtiments situés dans les zones sensibles aux nuisances sonores, les valeurs  $k_i$  sont grandes. Ces valeurs sont données par des acteurs du projet ou des spécialistes ;

$N_i$  : Nombre d'habitants dans la zone sonore impactée « i ».

Dans le cas où on veut prendre en compte plusieurs intervalles de niveaux sonores dans l'évaluation d'une variante et par exemple qu'on considère tous les courbes d'isophone ayant le niveau sonore supérieure à 55 dB(A), on obtient le Figure 3. 5 de synthèse .

Tableau 3.5 Nombre d'habitant exposé aux nuisances sonores.

Niveau sonore (dBA)	55-60	60-65	65-70	70-75
Nombre d'habitants $N_{i-j}$	120	60	40	22

avec :

$N_{i-j}$  : Nombre d'habitants exposé aux nuisances sonores dans chaque intervalle d'isophone (m) (selon le Tableau 3.5);

La formule de calcul de l'indicateur par intervalle devient :

$$N_F = \sum k_{i-j} N_{i-j} \quad (\text{Eq. 3. 24})$$

avec :

$N_F$  : Indicateur de nombre d'habitants total exposés aux nuisances sonores ;

$k_1, k_2, \dots$  : Coefficients pris en compte de l'importance de différents niveaux sonores.

### 3.3.3 Facilité de cheminement

#### 3.3.3.1 Définition

Cet indicateur a pour objectif de décrire la plus ou moins grande facilité de cheminer entre deux points. Cette facilité de cheminement dépend des caractéristiques du territoire en termes d'obstacles plus ou moins franchissable et des caractéristiques des réseaux de communications. Du point de départ au point d'arrivée, la facilité de cheminement peut être exprimée soit simplement en termes de distance de parcours, soit en termes de temps de parcours (en intégrant la vitesse de cheminement), soit en termes de coût de cheminement (sous forme de coût monétaire ou bien de consommation d'énergie par exemple). L'évaluation en termes de coût implique de prendre des hypothèses de consommations/coûts kilométriques et/ou en fonction du temps d'usage des moyens de transport.

#### 3.3.3.2 Utilité

Le principe de cet indicateur est semblable aux applications des systèmes d'aide à la navigation (aide au choix d'itinéraires) d'usage courant aujourd'hui sur les GPS ou sur internet : choix de l'itinéraire le plus court ; choix de l'itinéraire le plus rapide ; choix de l'itinéraire le plus économique... (cf. applications ViaMichelin, Mappy, GoogleMaps...).

Dans le cadre de l'évaluation de projets d'infrastructures routières, cet indicateur vise d'une part à comparer les variantes de tracé entre elles (gains relatifs) et vis-à-vis de l'existant (évaluation du gain par rapport à la situation initiale). D'autre part, toute variante s'insérant dans un réseau routier préexistant, cet indicateur peut être utilisé pour évaluer la contribution de chacune de ces variantes pour relier deux points quelconques du territoire (évaluation de la contribution du nouveau tracé au cheminement entre deux points). Ces évaluations/comparaisons pourront être conduites sur la base de critères de distance, temps ou de coût (dimensions [L] ; [T] ou [€, M ou J] respectivement).

#### 3.3.3.3 Principe de calcul

La Figure 3.28 représente un tronçon de nouvelle infrastructure routière, relié à des tronçons d'infrastructures préexistantes dans le territoire d'étude. A partir du maillage du territoire, la Figure 3.29 représente la distribution de valeurs en fonction de la plus ou moins grande facilité de cheminement caractéristique de chaque maille en fonction de l'occupation de la maille : maille de réseau à grande facilité de circulation ; maille de réseau à moindre facilité de circulation ; maille de territoire sans réseau de transport.

En pratique, les usagers des infrastructures de transport s'intéressent généralement en premier lieu au temps de parcours. On peut donc par exemple qualifier chaque maille par une vitesse caractéristique de cheminement. Dans l'exemple de la Figure 3.29, les valeurs respectives des mailles peuvent donc être respectivement de 80 (km/h) ; 40 et 0.

Dans le cas où plusieurs voies de communication se trouvent dans la même maille, la valeur de facilité de cheminement dans la maille (ex. 40 ou 80) est déterminée à partir de la voie présentant la plus longue section dans la maille.

A chaque maille (i) est ainsi attribuée une valeur caractérisant la plus ou moins grande facilité (ou difficulté) de cheminement. C'est-à-dire relative :

- pour une évaluation selon la dimension [L], par exemple à la sinuosité, ou à la déclivité (existence de relief) ;

- pour une évaluation selon la dimension [T], par exemple la vitesse de progression ;
- pour une évaluation selon les dimensions [€], [M] ou [J], par exemple le coût monétaire ou énergétique de la progression par unité de longueur (ex. consommation kilométrique des véhicules) ou de temps (ex. temps de fonctionnement des moteurs).

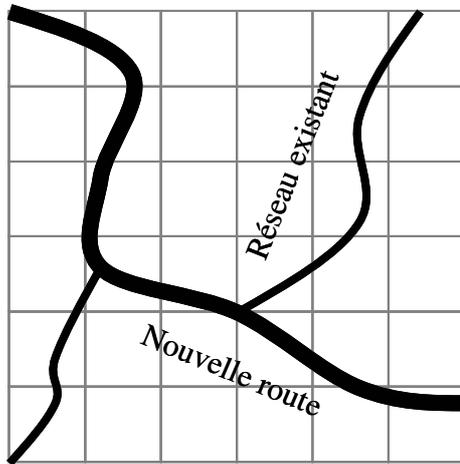


Figure 3.28 Caractéristique du territoire.

80	80	0	0	40	40
0	80	0	0	40	0
0	80	0	0	40	0
40	80	80	40	40	0
40	0	0	80	80	0
40	0	0	0	80	80

Figure 3.29 Matrice de facilité de déplacement.

### 3.3.3.4 Formule de calcul

La valeur de la facilité de cheminement (C) sur le parcours (p) du point A au point B sera donnée par la formule générale :

$$C_p = \sum_{i=\text{mailleA}}^{\text{mailleB}} F_i \quad (\text{Eq. 3. 25})$$

Avec  $F_i$  pouvant avoir selon les choix, la valeur :

- d'une longueur ;
- d'un temps (exprimé à partir de la vitesse de progression) ;
- d'un coût monétaire ou énergétique (cette dernière exprimée en masse ou volume de carburant ou directement en énergie).

Concernant critère temps de déplacement, la valeur  $F_i$  (qui prend la valeur d'un temps) est obtenue à partir de la vitesse ( $V_i$ ) affectée à la maille, selon la formule :

$$F_i = \frac{(1+\sqrt{2})}{2} \text{Taille de Maille} \frac{1}{V_i} \quad (\text{Eq. 3. 26})$$

Le facteur  $\frac{(1+\sqrt{2})}{2}$  permet d'obtenir le temps moyen de transit dans la maille à partir des deux orientations extrêmes possible de la voie par rapport à la maille : soit perpendiculaire aux côtés, soit diagonale.

### 3.3.3.5 Calcul à l'aide d'ArcGis

Le calcul de cet indicateur à l'aide d'ArcGis se base sur l'utilisation de la fonction « Distance de coût ». D'une façon générale, cette fonction identifie la cellule source (maille) la moins coûteuse (le « coût » pouvant avoir un sens monétaire ou autre) dans l'environnement d'une maille donnée. Cette fonction fournit une « feuille de route » identifiant la voie à suivre à partir de n'importe quelle cellule de la source la plus proche. Cette fonction permet ainsi de minimiser le cheminement entre la cellule de départ et la cellule de destination grâce à la recherche, en chaque point, des cellules présentant le moindre « coût » (exemple donné en Figure 3.30).

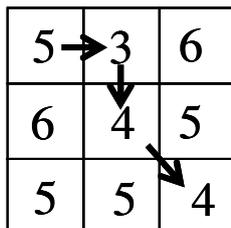


Figure 3.30 Principe de détermination du chemin de moindre coût.

Dans le cas d'un maillage de taille réelle (ex. une aire d'étude de 10.000 m de côté divisée en mailles de 50 m, soit 2.000 mailles), le principe simple (exploration progressive du point de départ au point de destination) expliqué ci-dessus, s'il était appliqué tel quel, pourrait conduire à proposer un cheminement qui ne serait pas nécessairement le chemin optimal (cf. exemple donné en Figure 3. 31). Dans l'exemple donné, le cheminement fléché A-B particulièrement coûteux, est initié simplement par le minimum local (valeur 1) proche du point A. Le cheminement par la valeur 2 aurait permis de bénéficier ensuite d'un cheminement total beaucoup moins coûteux.

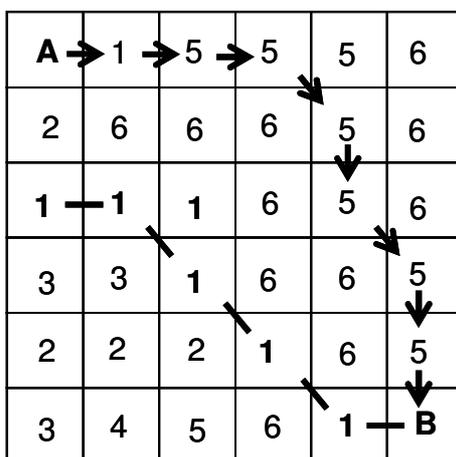


Figure 3. 31 Exemple de choix de cheminement non optimal.

La bonne application de la fonction « Distance de coût » du logiciel ArcGis sur des matrices de grande taille donc présentant une très grande diversité de possibilités à discriminer, nécessite donc un traitement préalable de l'ensemble de la matrice afin d'établir toutes les relations possibles entre le point-origine (A) et le point-destination (B).

Un exemple d'application de cette fonction à une matrice complexe (taille, et possibilités de cheminement) est donné ci-dessous. A partir de la maille-destination (ex. l'hôpital H), les distances de coût à partir de différents points du territoire sont calculées. Les couleurs claires indiquent un coût faible : elles sont logiquement centrées sur le point H. Les couleurs sombres indiquent un coût élevé : elles sont éloignées du point H. On observe logiquement que les voies d'accès convergent directement vers le point H présentent un dégradé de gris. La Figure 3.32 présente aussi le modèle ce calcul adopté.

Les données de calcul sont codifiées comme : « Hopital » et « r1\_routes\_vit » qui caractérisent l'hôpital et le réseau routier, et les vitesses de référence des routes. Le résultat fourni par la fonction « Distance de coût » codifié « CostDis\_H » et « C\_ba\_D\_Ho » (seule la carte « CostDis\_H » est représentées sur la Figure 3.32).

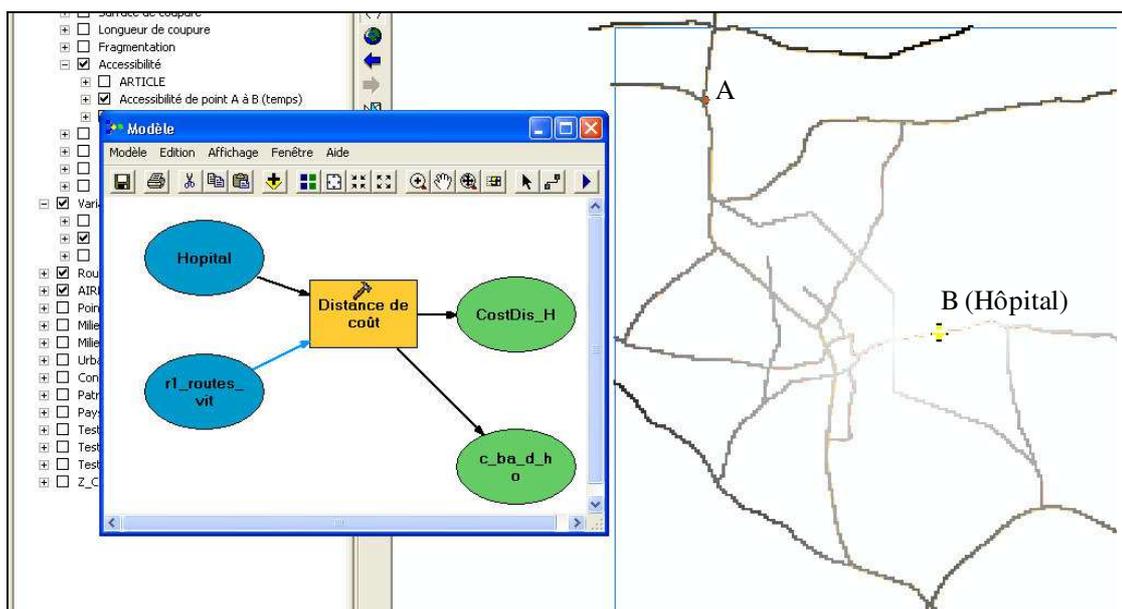


Figure 3.32 Modèle de calcul de la distance-coût.

Ensuite, on utilise la fonction de calcul « Chemin de coût » de Spatial Analyst (ou d'ArcGis – harmoniser) pour identifier l'itinéraire le moins coûteux (c'est-à-dire ici le plus rapide) entre un point de départ quelconque (nommé A dans le cas de la Figure 3.33) et le point-destination (H dans ce cas). Sur la base du territoire traité en termes d'iso-valeurs de coût de cheminement à partir du point-destination à l'étape précédente. La fonction « Chemin de coût » intercepte le point-origine désigné (A) et identifie à partir de lui le chemin le moins coûteux vers H. Dans l'exemple donné, les éléments de calcul sont codifiés comme suit : « Acce\_Point\_départ » est le point de départ du parcours ; « costdis\_h » et « C\_ba\_D\_Ho » sont les résultats de calcul.

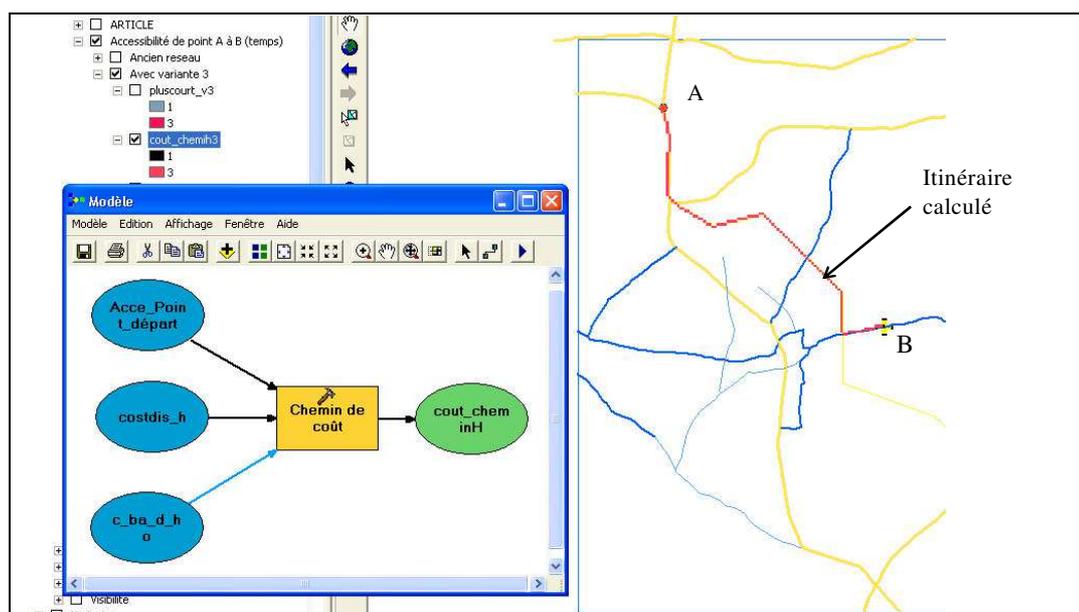


Figure 3.33 Modèle de calcul du chemin le plus rapide.

### 3.3.4 Effet sur la vision du territoire

#### 3.3.4.1 Définition de la vision du territoire

La vision depuis l'infrastructure sur le paysage est schématisée en Figure 3.34 et la vision depuis un point du territoire sur l'infrastructure est schématisée en Figure 3.35.

#### 3.3.4.2 Expression de l'indicateur dans la littérature

Le territoire (route, zone d'habitation...) est considéré comme un ensemble de mailles. Le but est de calculer la possibilité de vision de chaque maille.

Dans la littérature on trouve un indicateur nommé intrusion de visions. L'intrusion de vision de la route dans la cellule  $x$  ( $V_{(x)}$ ) peut être calculée de la manière suivante (Piantanakulchai M et Saengkhaio, 2003):

$$V_{(x)} = 1 - \frac{X}{X_{seuil}} \quad (\text{Eq. 3. 27})$$

avec :  $X$  : Distance du point de repère existant (m)

$X_{seuil}$  : Distance maximale affectant la vision du repère existant.

#### 3.3.4.3 Pertinence de l'indicateur « vision » en phase de l'étude d'avant projet sommaire

La vision est un facteur décrivant la relation entre les zones d'observation et les zones de perception. L'indicateur de vision se base sur :

- la longueur des tronçons des routes à partir desquelles on peut observer des zones pour le projet. La Figure 3.34 présente la valeur  $L_{vision}$ . Cet indicateur a un sens positif car il décrit l'avantage qu'apporte la route pour la découverte des paysages. Cela peut servir dans le cadre d'une volonté de tourisme dans une région. C'est un argument plutôt positif pour insérer une variante ;

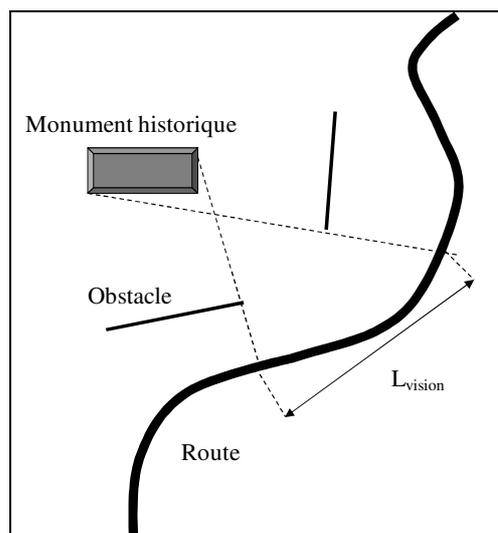


Figure 3.34 Longueur de vision depuis la route

- la longueur des zones d'attractivité à partir de laquelle on peut voir la route. C'est un indicateur négatif du projet. L'apparition de la route dans le paysage sera

généralement perçue comme néfaste dans la zone traversée. La Figure 3.35 présente un territoire sur lequel à partir d'un point (exemple : patrimoine), on peut observer 3 tronçons de la route  $l_{1vision}$  ;  $l_{2vision}$  ;  $l_{3vision}$ . Sur cette figure, les obstacles peuvent être des collines, des bâtiments... ; les zones en gris sont les zones perçues. Pour calculer vraiment les longueurs perçus il faudrait mesurer perpendiculairement à l'axe d'observation.

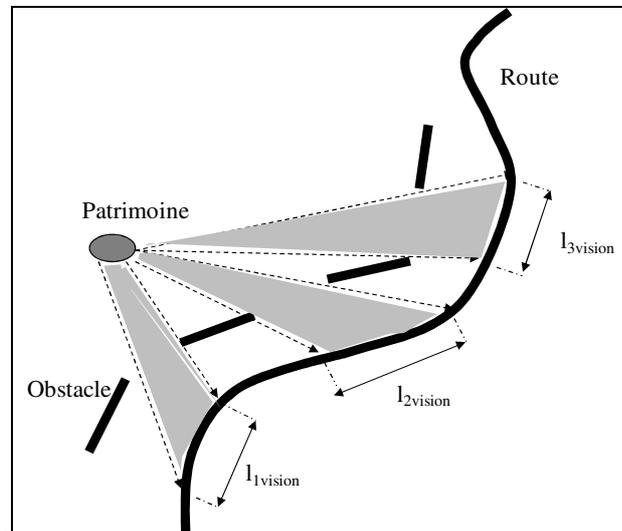


Figure 3.35 Longueur de vision depuis un point extérieur.

La vision est présentée sur les cartes dans ArcGIS, il est donc compréhensible et explicite pour les utilisateurs de route et les gestionnaires des patrimoines, gestionnaires de la région.

Cet indicateur est simple et facile à calculer. Il peut être calculé automatiquement grâce à ArcGIS. Cet indicateur n'est pas beaucoup utilisé dans les articles scientifiques.

#### 3.3.4.4 Formulation et méthode de calcul retenue

La formule de calcul de cet indicateur est :

$$L_V = \sum_{i=1}^N L_{vision}^i \quad (Eq. 3. 28)$$

avec :

$L_{vision}^i$  : longueur de vision partielle (m) ;

$L_V$  : indicateur « longueur de vision » total (m) ;

N : nombre des tronçons routiers vus.

On calcule pour les 2 cas mentionnés ci-avant :

##### a. Observation depuis la route

Cet indicateur est calculé par la fonction « champ de vision » dans ArcGIS.

Les données de calcul sont des patrimoines, le réseau routier, la topographie.

Pour comprendre mieux la fonction de calcul de cet indicateur, on présente un exemple sur le modèle qui est présenté en Figure 3.36 .Les données de calcul sont codifiées « monument historique » et « route ». Pour considérer un périmètre de 500 m autour du

« monument historique », on réalise une fonction « zone de tampon ». Le résultat codifié est « monu\_hiso\_buf50 ». A fin d'appliquer la fonction « Champ de vision », on doit convertir ce résultat en raster pour obtenir « r\_mo\_hi\_po ». Le résultat final est « v\_rou\_patri » présente des zones de vision des « monuments historiques » qu'on peut voir depuis le réseau routier.

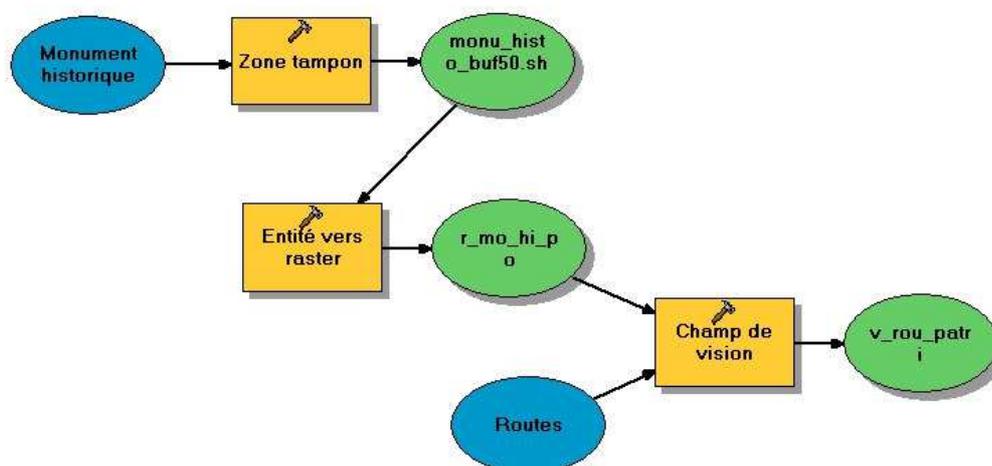


Figure 3.36 Exemple de modèle de calcul de la vision patrimoines-routes.

#### b. Observation depuis un point extérieur

Dans ce cas, on évalue par exemple à partir d'un site patrimonial, quels tronçons de route sont visibles. Ici, on échange le rôle des données dans la partie (a).

Le schéma de calcul avec ArcGIS est le même que sur la Figure 3.36. Le résultat du calcul est visualisé sous la forme d'une carte qui matérialise le trajet avec une couleur différente selon la position.

## 3.4 Indicateurs surfaciques

### 3.4.1 Réduction des surfaces disponibles - Prélèvement d'emprise

#### 3.4.1.1 Définition du problème d'emprise

On considère le cas d'une route qui traverse des zones sensibles ou des périmètres de protection de ces zones. L'indicateur calculé dans ce cas est la surface d'emprise de la route dans les zones sensibles.

Selon le type de route (nationale, départementale...), la largeur nécessaire varie d'une dizaine de mètres jusqu'à une centaine de mètres.

Le but ici est de développer des modèles de calcul des surfaces d'emprise car cet indicateur est utilisé pour résoudre des objectifs différents selon la nature des zones traversées sans différencier le type de zone à ce stade :

- Maintien du cadre de vie et des équipements de loisirs et d'accueil du public. La route traversant ces zones engendre la perte de l'espace de loisir des habitants, perte d'espaces naturels ;
- Protection et prévention des zones sensibles comme : aires viticoles et agricoles. La route traversant des zones agricoles cause des pertes de l'aire de travail et une difficulté de travail sur place.

#### 3.4.1.2 Pertinence de cet indicateur en phase d'étude d'avant projet sommaire

La surface d'emprise  $S_E$  ( $m^2$ ) est présentée sur les cartes dans ArcGIS, il est donc compréhensible et explicite pour les clients directement concernés par la traversée des zones sensibles.

#### 3.4.1.3 Expression de l'indicateur « surface d'emprise »

Cet indicateur est simple et facile à calculer. Il peut être calculé automatiquement grâce à ArcGIS. Cet indicateur n'est pas beaucoup utilisé dans les articles scientifiques, mais on l'utilise souvent dans les rapports d'évaluation des projets d'infrastructures pour classer les variantes.

La formule de calcul de cet indicateur est :

$$S_E = \sum_{i=1}^N S_i \times I_i \quad (\text{Eq. 3. 29})$$

avec :

$I_1, I_2, \dots$  : niveaux d'impact de chaque zone sensible emprise (sans unité).  $I_k=1, 2, \dots$  en fonction de notes des spécialistes ou d'acteurs du projet routier. Ces valeurs peuvent être les valeurs de sensibilité présentées dans le chapitre 2.

$S_1, S_2, \dots$  : surface d'emprise dans chaque zone sensible par la route ( $m^2$ ). En fait, la route traverse divers zones, mêmes des zones non importants. On s'intéresse plus des zones relatives à la qualité de vie des habitants, ou de l'infrastructure.

$S_E$  : indicateur « surface d'emprise » total (m)

N : nombre de surfaces traversées

### 3.4.1.4 Formulation et méthode de calcul retenue

Cet indicateur est calculé par la fonction « intersecter » dans ArcGIS. Afin de réaliser cette fonction, on importe d'abord des données : des zones sensibles (patrimoines, aire viticole,...), des variantes de tracé. La Figure 3.37 illustre la méthode d'ArcGIS pour calculer cet indicateur. En utilisant la fonction « intersecter » du module Spatial Analyst, on obtient des surfaces d'emprise. D'après la Figure 3.37, les surfaces codifiées comme « 1polygone » et « 1polygone2 » sont les données d'entrée de la fonction. La route peut être considérée comme une surface très longue.

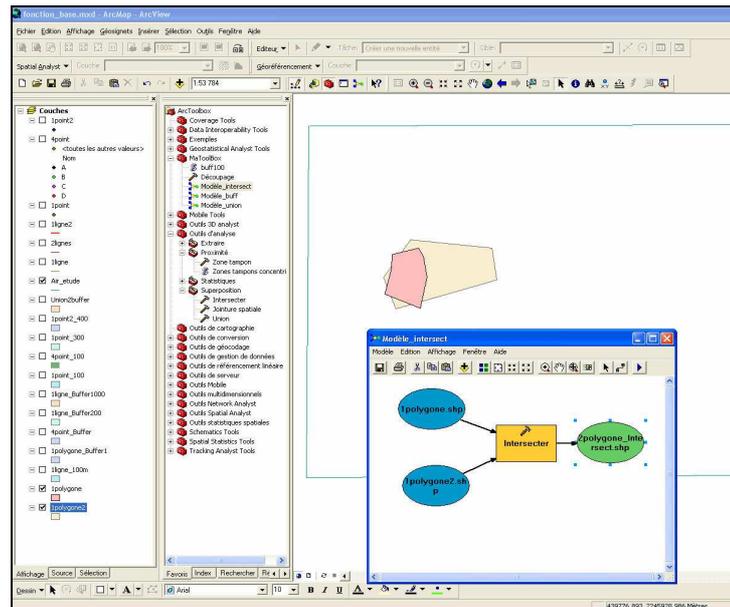


Figure 3.37 Intersection entre 2 surfaces.

Le résultat fourni par la fonction « intersecter » codifié « 2polygones\_intersect » sont des surfaces d'emprise représentées sur la Figure 3.38. En « cliquant droit » sur « 2polygones\_intersect », on obtient le compte des surfaces de coupure. Le résultat montre la surface d'emprise d'une route dans une zone sensible.

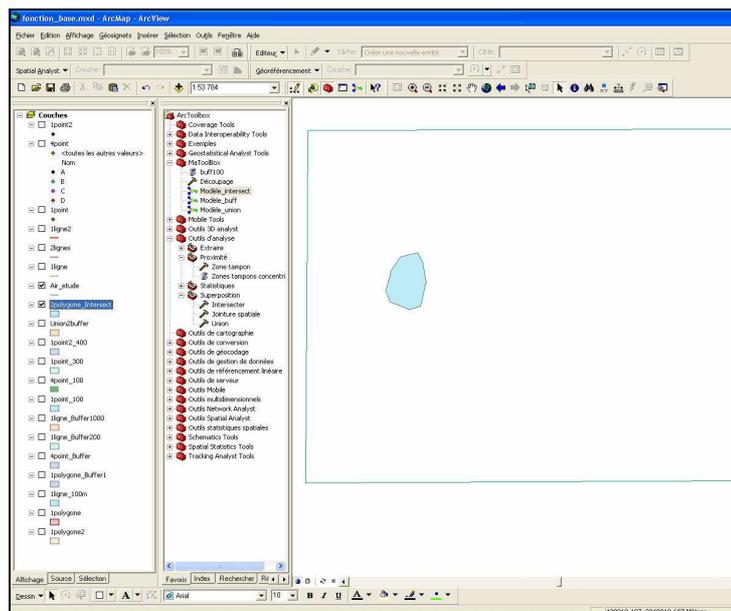


Figure 3.38 Résultat de l'intersection des surfaces.

### 3.4.2 Rayonnement

#### 3.4.2.1 Définition

Le rayonnement caractérise la capacité d'accéder plus ou moins facilement d'un point du territoire à différentes zones du territoire. Cette facilité dépend des caractéristiques du territoire en termes de réseaux de communication. Cet indicateur peut être mesuré en termes de distance de parcours, de temps de parcours ou de coût de déplacement (monétaire ou autre). Il est basé sur le même principe que celui de la facilité de cheminement, mais généralisé à un territoire défini par différentes zones de destination.

#### 3.4.2.2 Utilité

L'indicateur de rayonnement a le sens inverse de l'« accessibilité » (Miller and Wu, 2000, Zhu and Liu, 2004 ; Ortéga et al., 2004). Cette dernière définie, sur la base des mêmes grandeurs (distance, temps, coût d'accès) la plus ou moins grande facilité d'accès à un point particulier du territoire dont la facilité d'accès est essentielle à l'utilité, la fonctionnalité, la rentabilité (ex. hôpital, gare, zone commerciale...). L'accessibilité décrit un phénomène centripète, alors que le rayonnement décrit un phénomène centrifuge. Le rayonnement d'un point particulier permet de caractériser sa plus ou moins bonne situation par rapport à un ensemble de destinations sur le territoire. Le rayonnement généralisé caractérise pour chaque point du territoire sa facilité d'accès aux autres points du territoire. Il représente donc un bon indicateur de la facilité d'irrigation du territoire par le réseau de voirie. Il permet aussi de vérifier que des zones devant être moins desservies (par exemple pour des raisons de protection environnementale) le sont effectivement moins. Le rayonnement généralisé permet donc de juger de l'intérêt d'un réseau de voirie et de l'apport d'un nouveau tronçon à la desserte de zones particulières.

#### 3.4.2.3 Formule de calcul

Par modification de la formule de l'accessibilité (Zhu and Liu, 2004 ; Gutiérrez et al., 2010), on propose la formule de calcul du rayonnement ( $P_i$ ) du point-origine  $i$  :

$$P_i = \sum_{j=1}^n C_{ij} \quad (\text{Eq. 3. 30})$$

dans laquelle,

$C_{ij}$  : est la valeur du chemin optimal du point-origine «  $i$  » vers le point-destination «  $j$  » ;

$n$  : est le nombre de points-destinations pris en compte.

#### 3.4.2.4 Expression de l'indicateur

Dans les exemples et cas d'études suivants, de la même façon que pour l'indicateur facilité de cheminement, l'optimisation se fera sur le temps de parcours ( $C$  à la dimension [T]). Comme dans l'indicateur Cheminement, les  $C_i$  sont estimés à partir de vitesses moyennes de progression dans chaque maille du territoire.

La Figure 3.39 illustre le calcul du rayonnement de la zone d'habitation  $i_1$ . vis-à-vis de différentes zones (lieux de travail, zones de services, de loisirs, patrimoniales...  $j_1$  à  $j_6$ ) en fonction d'un réseau de voirie donné.

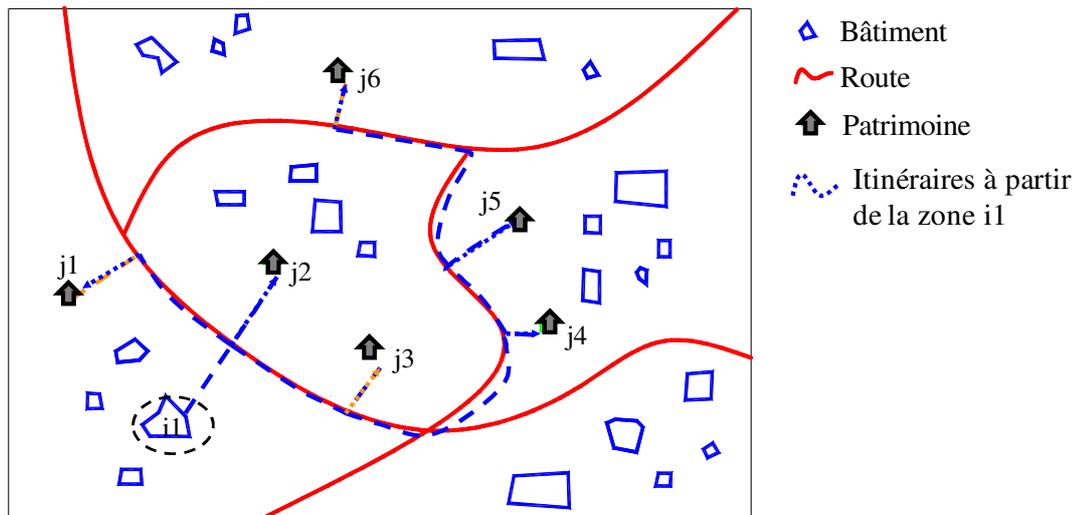


Figure 3.39 Rayonnement de la zone « i1 » .

Pour le calcul du rayonnement généralisé (intérêt pour le territoire dans son ensemble), on calcule les valeurs  $P_i$  pour chaque maille ( $m$ ) du territoire vis-à-vis de  $n$  destinations ( $n \leq m$ ). L'état initial est réalisé avec le réseau routier préexistant. Ensuite, les calculs sont effectués après introduction de chaque variante à analyser. Par la différence opérée entre la carte de rayonnement obtenu grâce à la variante, et la carte initiale, on fait apparaître les « zones d'avantage de rayonnement » grâce à la nouvelle infrastructure (indicateur de d'avantage de rayonnement ( $S_r$ ) est exprimé en  $m^2$ ).

Les cartes d'avantage de rayonnement ( $S_r$ ) seront présentées dans le chapitre 4 en application de cas d'études. La figure 3.38 présente un exemple de carte de rayonnement généralisé ( $P$ ). Les points-origines sont les zones d'habitation (bleues). Les points-destinations sont les zones patrimoniales (vertes). L'échelle de gris de 0 à 1 est normée par rapport au temps de parcours les plus long. Les zones claires sont celles pour lesquelles l'accès est plus rapide à partir des zones d'habitation avec le réseau de voirie existant. On constate que toutes les zones patrimoniales, du fait de leur proximité avec le réseau de voirie ou avec les zones d'habitation, se trouve dans la zone la plus claire.

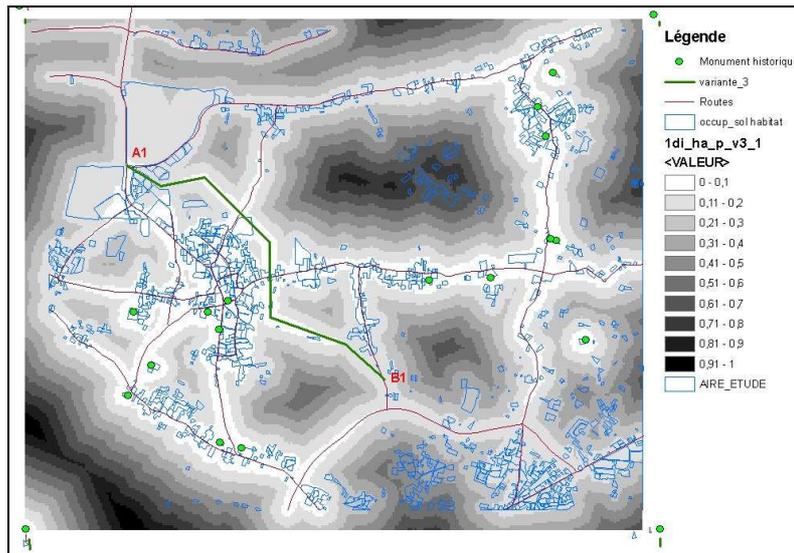


Figure 3.40 Rayonnement depuis des zones d'habitation vers différents sites.

### 3.4.2.5 Calcul à l'aide d'ArcGis

La Figure 3.41 présente la méthode de programmation dans ArcGis. La zone comprise dans le rectangle pointillé correspond à l'évaluation de la situation initiale (réseau existant et habitations existantes). La zone hors pointillés correspond à la ligne de calcul émulée lorsqu'une variante de nouveau tracé est introduite (cas traités dans le chapitre 4).

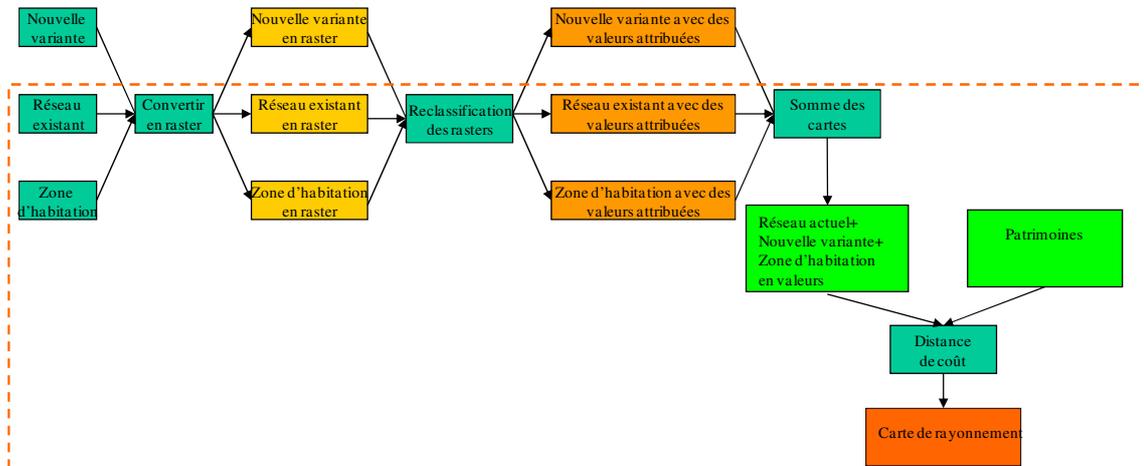


Figure 3.41 Modèle de calcul du rayonnement avec l'insertion de la nouvelle variante

Le principe de calcul du rayonnement se base sur la fonction « Distance de coût » d'ArcGIS. A partir de la carte du territoire, on applique la fonction « convertir des données vecteurs en rasters » afin de réaliser le maillage du territoire (Figure 3.42). La Figure 3.42 présente la conversion des routes.

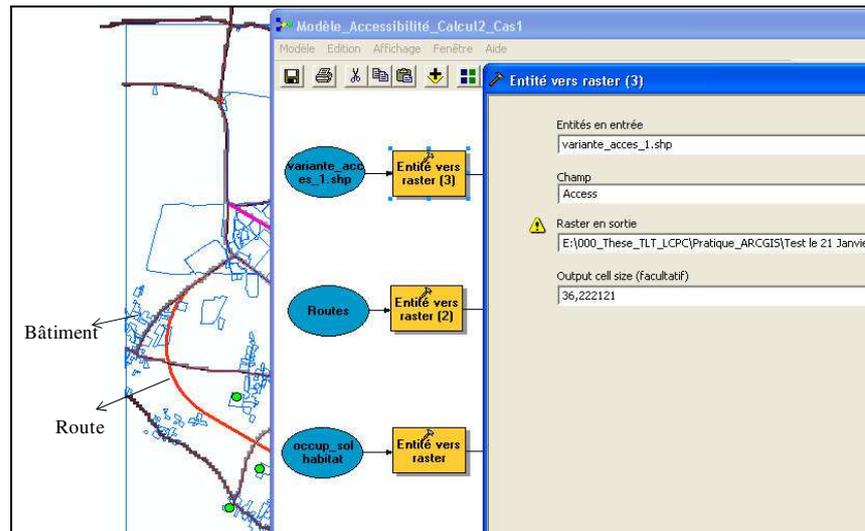


Figure 3.42 Conversion des vecteurs en rasters.

Ensuite, on attribue à chaque maille une valeur correspondante à la capacité de déplacement. Pour les routes à grande vitesse, on attribue des valeurs faibles (inverse de la vitesse) et au contraire des valeurs fortes pour les endroits de déplacement difficiles. Par exemple on attribue des valeurs : routes = 1, zones d'habitation = 4 ; autres positions = 20. Ainsi les parcours privilégient des routes principales par rapport au cheminement à travers les zones d'habitation.

Ensuite, la fonction « Distance de coût », calcule la capacité d'accéder à aux zones-destinations depuis de chaque point-origine du territoire. C'est une fonction dans ArcGIS qui est présentée dans la Figure 3.43.

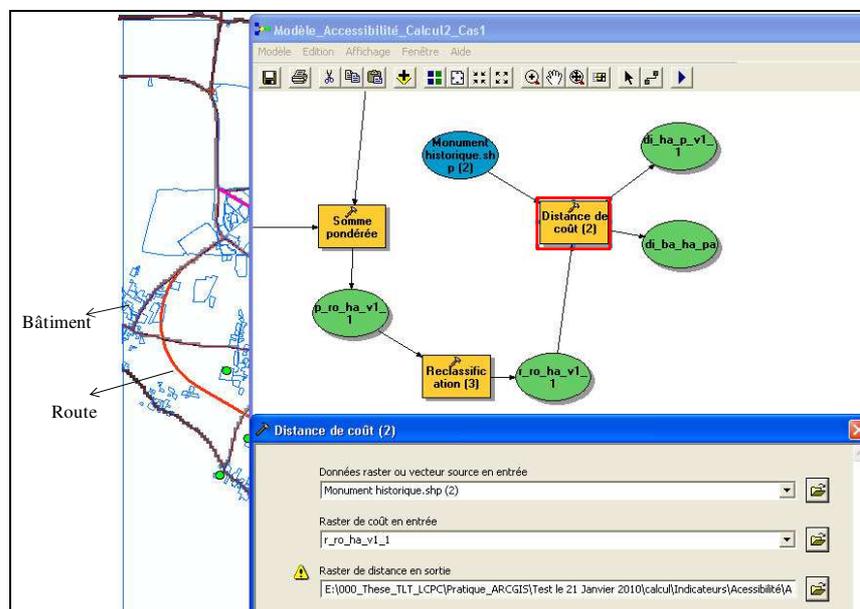


Figure 3.43 Modèle « distance de coût ».

## 4 SYNTHÈSE DES INDICATEURS PROPOSÉS

Le tableau 3.6 récapitule l'ensemble des indicateurs proposés dans le cadre de ce chapitre pour effectuer la comparaison des variantes de tracé.

Tableau 3.6 Récapitulation des indicateurs.

Types d'indicateur	Indicateur (Signification)	Formule de calcul	Equation utilisée	Comparaison des variantes
Scalaire	Impacts environnementaux globaux. Indicateur : $I_{eg}$	$GWP_i = \frac{\int_0^T a_i c_i(t) dt}{\int_0^T a_{CO_2} c_{CO_2}(t) dt}$	(Eq. 3.1)	Calcul pour toutes les variantes et choix de la valeur minimale
		$EI_i = \frac{m_i^P}{\mu_i} \times \frac{\mu_{PO_4^{3-}}}{\mu_{PO_4^{3-}}^P}$	(Eq. 3.2)	
		$AP_i = \frac{n_i^{H^+}}{\mu_i} \cdot \frac{\mu_{SO_2}}{n_{SO_2}^{H^+}}$	(Eq. 3.3)	
		$POPC_i = \frac{m_{O_3}^i}{m_{O_3}^{éthylène}}$	(Eq. 3.4)	
		$TP_{i,c_1 \rightarrow c_2} = w_i \cdot \frac{RCR_{i,c_1 \rightarrow c_2}}{RCR_{réf}}$	(Eq. 3.5)	
	Effet sur les écosystèmes- Fragmentation du territoire. Indicateur : $I_F$ ( $m^2$ ).	$V_{aire} = 0,8 \times \sum_{i=1}^{Ne} S_i \times v_i^{aire} ;$	(Eq. 3.7)	Calcul pour toutes les variantes et choix de la valeur minimale
		$I_{aire} = 0,42 \times (V_{aire}^{initial} - V_{aire}^{variante}) ;$	(Eq. 3.8)	
		$V_{iso} = 0,8 \sum_{i=1}^{Ne} S_i \times v_i^{iso} ;$	(Eq. 3.9)	
		$I_{iso} = 0,42 \times (V_{iso}^{initial} - V_{iso}^{variante}) ;$	(Eq. 3.10)	
		$V_{per} = 0,8 \sum_{i=1}^{Ne} S_i \times v_i^{per} ;$	(Eq. 3.11)	
		$I_{per} = 0,42 \times (V_{per}^{initial} - V_{per}^{variante}) ;$	(Eq. 3.12)	
		$I_F = I_{aire} + I_{iso} + I_{per}$	(Eq. 3.13)	

Ponctuelles	Effets sur la sécurité et circulation-crédation des intersections. Indicateur : $N_C$	« Intersection »		Calcul pour toutes les variantes et choix de la valeur minimale
Segments/Linéaires	Effet sur le patrimoine bâti et sur le milieu naturel et les espaces disponibles. Indicateur : $L_C$ (m)	$L_C = \sum_{k=1}^N L_k \times I_k$	(Eq. 3.14)	Calcul pour toutes les variantes et choix de la valeur minimale
	Nuisance sonore-longueur de façade impactée – habitants exposés. Indicateur : $L_F$ (m) ; $N_F$ (sans unité)	$L_{eq} = 10 \lg_{10} \left( \frac{1}{T_{exp}} \int_0^{T_{exp}} 10^{L/10} dt \right)$ $L_F = \sum_{k=1}^{N_f} L_k$ $N_F = \sum_{k=1}^{N_f} N_k$	(Eq. 3.17)  (Eq. 3.21)  (Eq. 3.24)	Calcul pour toutes les variantes et choix de la valeur minimale
	Facilité de cheminement Indicateur : $I_p$ (itinéraire)	$C_p = \sum_{i=mailleA}^{mailleB} F_i$	(Eq. 3.25)	Calcul pour toutes les variantes et choix de la valeur minimale
	Effet sur la vision du territoire. Indicateur $L_V$ (m)	$L_V = \sum_{i=1}^N L_{vision}^i$	(Eq. 3.28)	Calcul pour toutes les variantes et choix de la valeur minimale
Surfaciques	Réduction des surfaces disponibles-Prélèvement d'emprise. Indicateur : $S_E$ (m <sup>2</sup> )	$S_E = \sum_{i=1}^N S_i \times I_i$	(Eq. 3.29)	Calcul pour toutes les variantes et choix de la valeur minimale

	<p>Rayonnement depuis une zone de territoire vers différents points sur le territoire. Indicateur <math>S_r</math> (<math>m^2</math>)</p>	$P_i = \sum_{j=1}^n C_{ij}$	<p>(Eq. 3.30)</p>	<p>Calcul pour toutes les variantes et choix de la valeur maximale</p>
--	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------	-------------------	------------------------------------------------------------------------

Les méthodes de calcul des indicateurs proposées dans ce chapitre concernent la plupart des objectifs du développement durable. De plus, tous ces indicateurs sont quantitatifs et prennent en compte le territoire avant et après l'insertion des variantes de tracé. Cela permet d'évaluer chaque variante de tracé et comparer des variantes par un système d'indicateur assez complexe.

Cependant, parmi les méthodes au-dessus, il reste encore des méthodes dont les calculs sont simples (indicateur ponctuel) et ne prennent pas tous les possibilités (nuisance sonore, ACV). Ou bien, pour quelques méthodes, on se base sur les critères personnels qu'il faut valider avec d'autres experts (accessibilité, rayonnement).

Les méthodes de calculs ne sont pas complexes mais efficaces dans le calcul d'impact d'un projet routier. En effet, ces méthodes se basent sur les indicateurs typiques dans chaque domaine. Le présent travail s'appuie sur les pratiques du bureau d'études et ajoute quelques indicateurs, il n'a pas vocation à évaluer en profondeur l'interprétation de ces valeurs d'indicateurs qui restera du ressort du bureau d'études un fois l'outil mis en application sur le terrain. Par exemple : pour le calcul des indicateurs graphiques, on établit des modèles qui sont proches de ceux utilisés traditionnellement par le bureau d'étude (calcul des longueurs, des surfaces des coupures, du nombre d'intersection). Les méthodes sont intégrés des logiciels de calcul récents qui sont développés dans les recherches précédentes : Ecorce pour calculer des indicateurs environnementaux globaux ; SoundPlan pour modéliser la nuisance sonore sur le territoire...

## 5 CONCLUSION

Dans le chapitre 3, on a développé des méthodes de calcul des indicateurs pour des variantes de tracé.

Dans ce chapitre, un ensemble d'indicateurs est obtenu à partir des fonctions graphiques d'ArcGIS. Dans chaque cas, la démarche est la suivante :

- Importation d'une carte graphique avec les données ;
- Calcul avec une ou plusieurs fonctions ;
- Obtention de résultats intermédiaires sous la mode carte, tableau... ;

Les méthodes de calcul permettent de sortir des résultats graphiquement comme le cahier des charges de l'outil l'envisageait avec ArcGIS. Dans le chapitre suivant, on présente l'application de ces méthodes dans le calcul d'impact pour un projet routier. La comparaison des variantes de tracé et le choix d'une meilleure variante sont également réalisés.

## **CHAPITRE 4**

### **APPLICATION DE LA DÉMARCHE À UN CHOIX DE VARIANTE DE TRACE D'INFRASTRUCTURE**

## 1 INTRODUCTION

Ce chapitre a pour le but de calculer des indicateurs de développement durable en utilisant les méthodes présentées dans le chapitre précédent pour les différentes variantes retenues. A partir des résultats obtenus, on peut comparer des variantes de tracé et proposer un classement de celles-ci pour chaque indicateur.

Cette partie est réalisée afin de comparer des variantes en utilisant des fonctionnalités d'ArcGIS complémentaires à celles du chapitre 3. A partir des résultats de calcul, on peut rechercher la meilleure variante de tracé.

Les indicateurs sont calculés et analysés pour toutes les variantes de tracé du projet N°1, hormis l'indicateur « nuisance sonore » pour lequel il n'existait pas de données pour ce projet. Par conséquent, le calcul de l'indicateur « nuisance sonore » a été réalisé pour les cas de deux autres projets (N°3 et 4).

La première partie du chapitre rappelle les caractéristiques des tracés étudiés pour les différents projets. La deuxième partie donne en détails les résultats par indicateurs ainsi qu'un classement simple des variantes pour chaque indicateur. La troisième partie propose une réflexion sur la méthode de classement des variantes.

## 2 DESCRIPTION GÉOMETRIQUE DES TRACES

Dans le cas du projet N°1, les variantes identifiées (ex :5 variantes sur la Figure 4. 1) par le bureau d'étude seront étudiées car elles prennent en compte les normes techniques pour la réalisation des voies. Les variantes trouvées à l'aide d'ArcGIS dans le Chapitre 2 ne sont pas prises en compte car le résultat remis en perspective avec le projet N°1 permet au bureau d'étude d'en tirer directement des conclusions opérationnelles qui dépassent le cadre de la thèse. Les Figures 4.2a et 4.2b rappellent les tracés sur lesquels l'indicateur « nuisance sonore » sera testé.

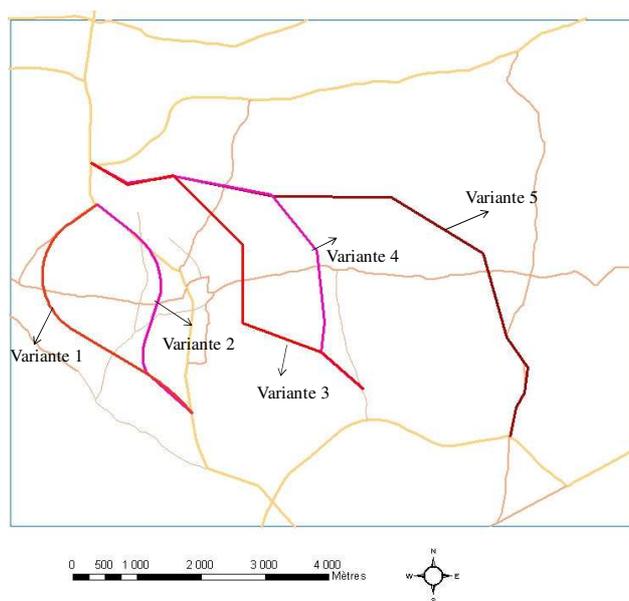
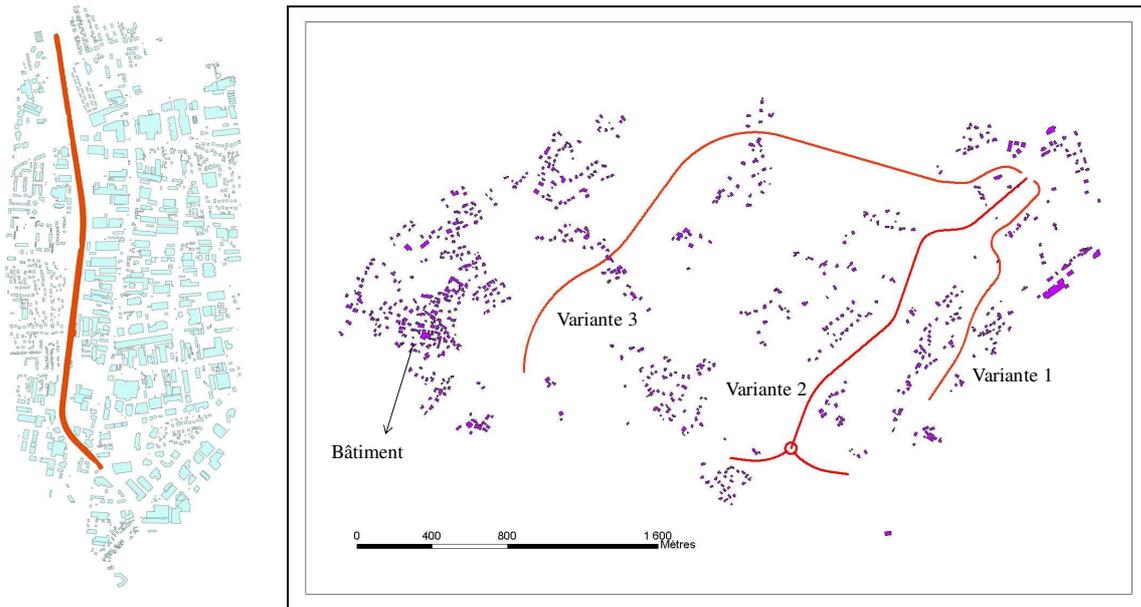


Figure 4. 1 Variantes du projet N°1



a) Tracé du projet N°3

b) Variantes du projet N°4

Figure 4.2 Projets N°3 et N°4

### 3 COMPARAISON DES VARIANTES PAR INDICATEURS ET CLASSEMENT PAR INDICATEUR

#### 3.1 Impacts globaux environnementaux

La thèse n'aborde l'utilisation d'Ecorce que pour le calcul des indicateurs (Tableau 3.6) pour une structure de chaussée. On utilise le logiciel Ecorce pour calculer les indicateurs environnementaux globaux unitaires pour 1 km de variante de chaussée et on considère les résultats dans le cas des chaussées pour toute la longueur de la variante.

##### 3.1.1 Données et hypothèse de calcul

Les données nécessaires au calcul sont relatives aux matériaux et techniques utilisées, ce qui comprend le choix de la structure et des matériaux de construction ainsi que des engins nécessaires à la construction.

La chaussée est construite pour une route de 25 m de large. Les matériaux et profil en travers sont présentés dans la Figure 4.3. On suppose que la même structure de chaussée est utilisée pour toutes les variantes de tracé. La structure de chaussée se compose de :

- Couche de roulement : 2,5 cm de matériau de béton bitumineux très mince (BBTM). Ce matériau constitue du 94,6% de granulat et 5,4% du bitume. La masse volumique de ce matériau est de  $1900 \text{ kg/m}^3$ .
- Couche de liaison : 6,5 cm de matériau de BBSG. Ce matériau constitue de 94,5% du granulat et 5,5% du bitume. La masse volumique de ce matériau est de  $2350 \text{ kg/m}^3$ .

- Couche de base : 13 cm de matériau de graves bitumes. Ce matériau constitue de 95,7% du granulat et 4,3% du bitume. La masse volumique de ce matériau est de  $2300 \text{ kg/m}^3$ .
- Couche de base : 13 cm de matériau de graves bitumes. Ce matériau constitue de 95,7% du granulat et 4,3% du bitume. La masse volumique de ce matériau est de  $2300 \text{ kg/m}^3$ .

Le type de route correspond au réseau non structurant TC6 (20) pour une plate forme PF2 de qualité moyenne (entre 6 million et 17 million pour 30 ans) d'après la catalogue de structure de chaussée (SETRA-LCPC, 1998).

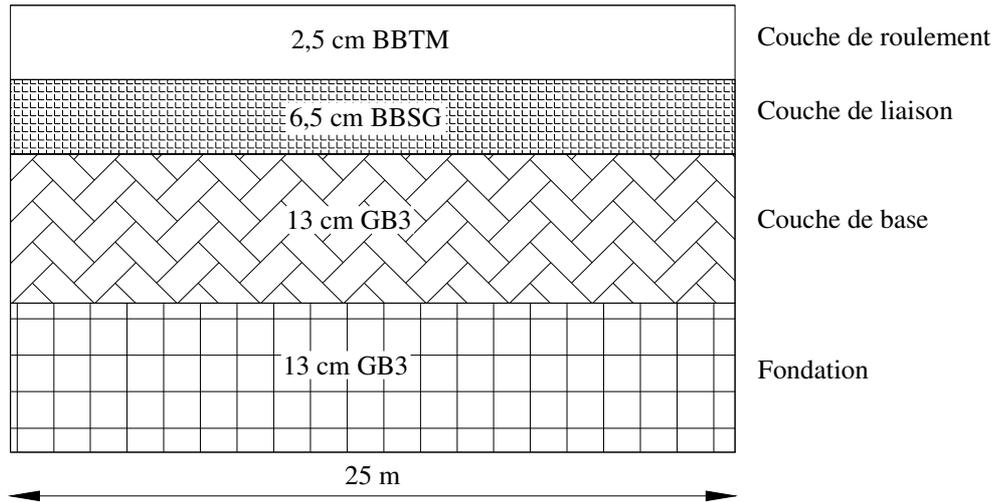


Figure 4.3 Structure de chaussée des variantes étudiées – Projet N°1

La Figure 4.4 illustre les données d'entrée d'Ecorce (Annexe 4) relatives à la structure réalisée et aux matériaux utilisés.

ECORCE 1.1.3 - 28juil

Fichier

Définition du cas d'étude    Resultat

Désignation opération ou année:	2011					
Type de couche	Nom du matériau	Epaisseur (cm)	Surface (m <sup>2</sup> )	Matériau alternatif	Déconstruction	Type de matériau
<a href="#">Modifier : Roulement</a>	BBTM	2.5	25000.0	aucun	non	Matériau bitumineux
<a href="#">Modifier : Liaison</a>	BBSG	6.5	25000.0	aucun	non	Matériau bitumineux
<a href="#">Modifier : Base</a>	GB3	13.0	25000.0	aucun	non	Matériau bitumineux
<a href="#">Modifier : Fondation</a>	GB3	13.0	25000.0	aucun	non	Matériau bitumineux

Figure 4.4 Copie d'écran ECORCE pour les 4 couches de chaussée

La distance de transport des matériaux jusqu'au site de construction de la route est un paramètre qui peut influencer fortement la valeur finale des indicateurs, en particulier pour les chantiers de grande ampleur. Cette influence peut être atténuée en privilégiant des sources de

production plus proches (François et al., 2010). A ce stade ce paramètre n'a pas été testé par contre, compte tenu de l'éloignement entre les variantes Est et Ouest du projet N°1, l'interdistance de transport de 10 km entre celles-ci est prise en compte dans l'évaluation.

Engins utilisés :

Selon la nature des couches de chaussée réalisées, des engins de construction différents sont nécessaires. Des scrapers, des bulldozers, des pelles mécaniques et des tombereaux sont utilisés pour les travaux de terrassements préalables à la réalisation des couches de chaussée. Ensuite, pour la réalisation des couches de chaussée, outre les camions amenant les granulats extérieurs, des compacteurs ou des niveleuses sont utilisés pour atteindre les épaisseurs et la compacité requise (98%). Enfin, une répandeuse est utilisée pour réaliser la couche de liaison ou couche de roulement.

### 3.1.2 Résultats obtenus

La figure 4.5 présente les résultats de calcul de l'énergie consommée qui identifie la contribution de chaque procédé à l'indicateur énergie et qui permet de séparer également la contribution de chaque couche ainsi que celle de chaque opération. La majeure partie de la consommation d'énergie est imputable à la centrale d'enrobage à chaud et à la production du bitume. La couche de base et la couche de fondation sont les principales consommatrices d'énergie en raison des matériaux et quantités utilisés (grave bitume).

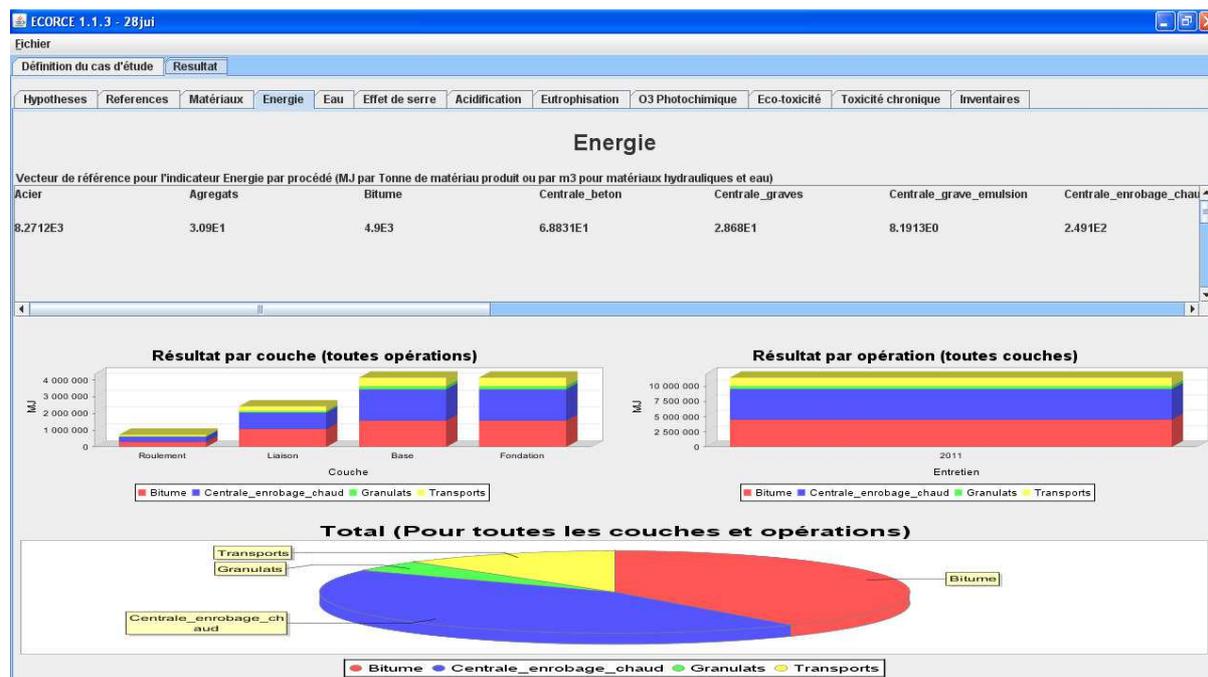


Figure 4.5 Résultat d'Ecorce pour le calcul de l'énergie

La figure 4.6 présente les résultats de calcul concernant l'indicateur « effet de serre ». La distribution des résultats est similaire à celle de l'énergie, le bitume (étant un produit hydrocarboné) et la centrale d'enrobage à chaud (consommatrice d'énergie fossile) étant des sources importantes de CO<sub>2</sub>.

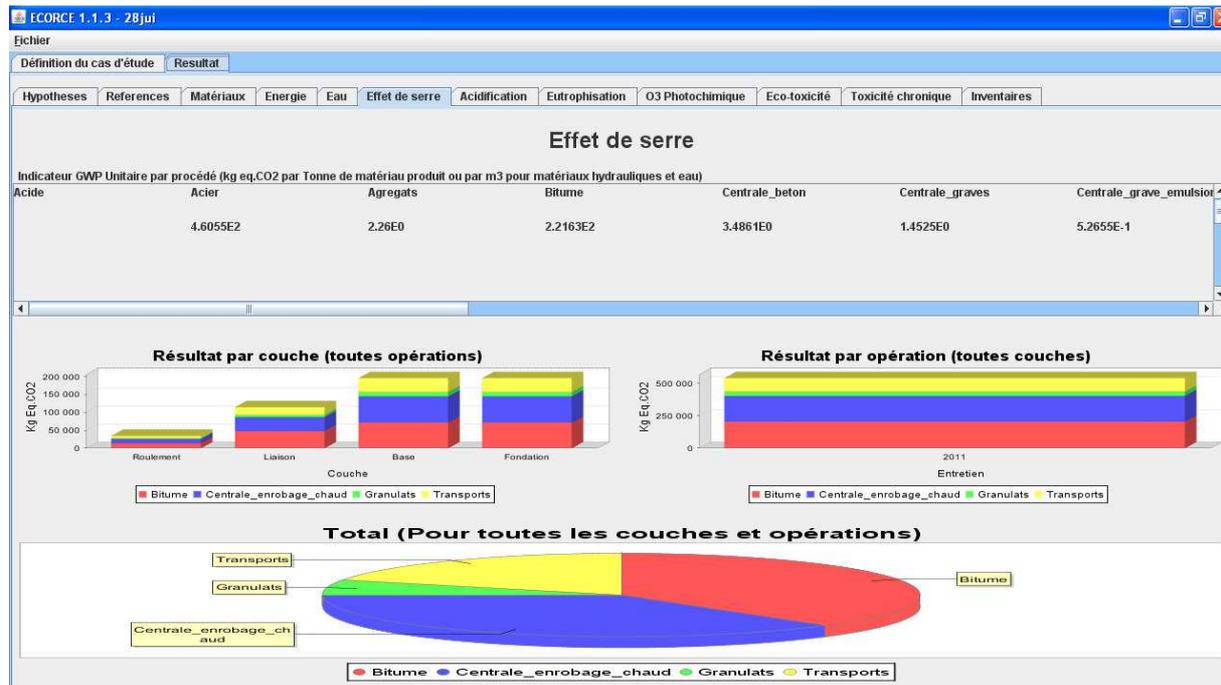


Figure 4.6 Résultat d'Ecorce de calcul de l'effet de serre

La Figure 4.7 présente les résultats de calcul concernant l'indicateur « acidification » avec une part prépondérante du bitume (source de composés soufrés), suivi par le transport, en lien avec la combustion du carburant.

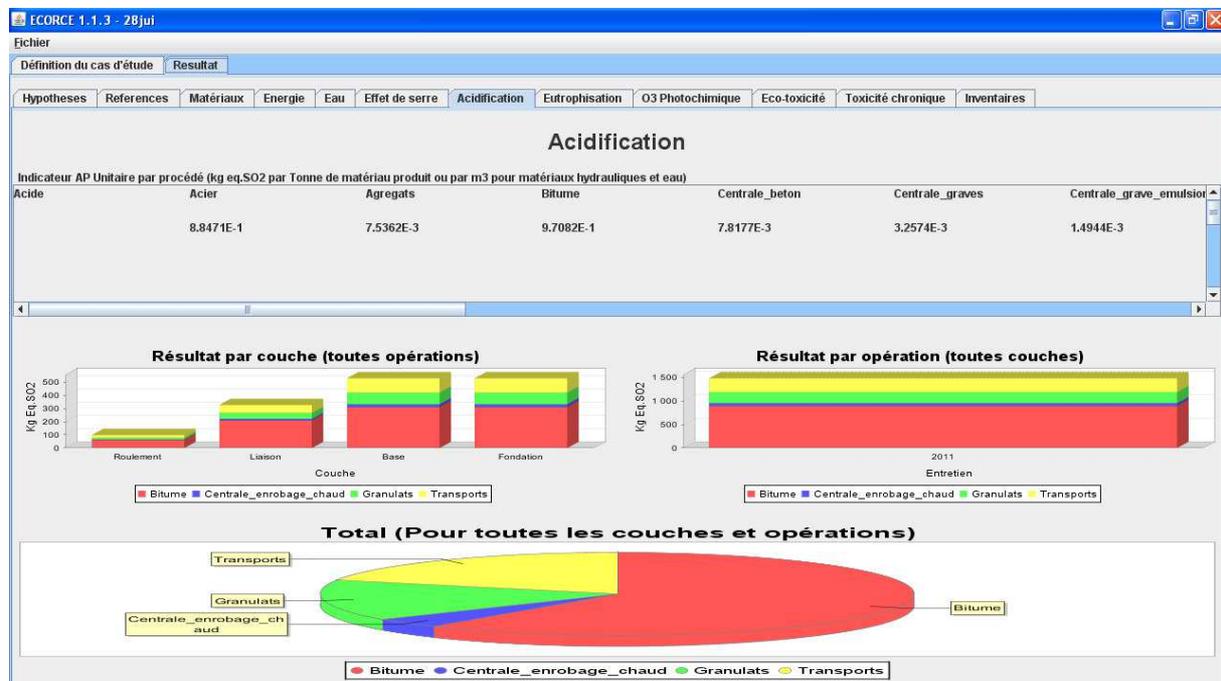


Figure 4.7 Résultat d'Ecorce de calcul de l'acidification

La Figure 4.8 présente les résultats de calcul concernant l'indicateur « ozone troposphérique ». Le bitume constitue la part principale (près de la moitié) de la source. Le transport et la production des granulats sont à part égale (environ un quart).



Figure 4.8 Résultat d'Ecorce de calcul de l'ozone troposphérique

La Figure 4.9 présente les résultats de calcul pour l'indicateur « ressource en eau ». La consommation d'eau apparaît imputable à bitume.



Figure 4.9 Résultat d'Ecorce de calcul de l'eau

La Figure 4.10 présente le résultat de calcul relatif aux matériaux consommés dans la construction de chaussées.



Figure 4.10 Résultat d'Ecorce pour le calcul des matériaux consommés

Afin de comparer des variantes d'infrastructures on différenciera l'indicateur total dont la valeur exprimée par km de chaussée dans le modèle Ecorce varie avec la longueur totale de la variante.

Le Tableau 4.1 présente les valeurs des impacts globaux environnementaux pour la structure de chaussée décrite dans la Figure 4.3 pour 1 km de chaussée et 2 voies.

Tableau 4.1 Impacts globaux environnementaux pour 1 km de chaussée

	<b>Roulement</b>	<b>Liaison</b>	<b>Base</b>	<b>Fondation</b>	<b>Total</b>
<b>Matériaux (m<sup>3</sup>)</b>	2375	7898	14950	14950	40173
<b>Energie (MJ)</b>	719634	2412705	4118995	4118995	11370329
<b>Eau (m<sup>3</sup>)</b>	12	41	60	60	173
<b>Effet de serre (kg Eq.CO<sub>2</sub>)</b>	33983	113909	195069	195069	538029
<b>Acidification (kg Eq.SO<sub>2</sub>)</b>	97	326	529	529	1481
<b>Eutrophisation (kg Eq.PO<sub>4</sub>)</b>	6	20	34	34	95
<b>Ozone photochimique (kg Eq.éthylène)</b>	48	160	257	257	722
<b>Ecotoxicité chronique (kg Eq. 1,4DCB)</b>	5983	20149	32371	3271	61774

Il est possible de calculer le tableau pour 1 cm d'épaisseur de chaque couche. Le Tableau 4.2 présente ces résultats. Les valeurs obtenues pour la couche de roulement et la couche de liaison sont identiques car on utilise les mêmes formules et épaisseurs de construction.

Tableau 4.2 Impacts globaux environnementaux pour 1 cm d'épaisseur de chaque couche de chaussée

	<b>Roulement</b>	<b>Liaison</b>	<b>Base</b>	<b>Fondation</b>
<b>Matériaux (m3)</b>	950	1215	1150	1150
<b>Energie (MJ)</b>	287854	371185	316846	316846
<b>Eau (m3)</b>	5	6	5	5
<b>Effet de serre (kg Eq.CO<sub>2</sub>)</b>	13593	17524	15005	15005
<b>Acidification (kg Eq.SO<sub>2</sub>)</b>	39	50	41	41
<b>Eutrophisation (kg Eq.PO<sub>4</sub>)</b>	2	3	3	3
<b>Ozone photochimique (kg Eq.éthylène)</b>	19	25	20	20
<b>Ecotoxicité chronique (kg Eq. 1,4 DCB)</b>	2393	3100	2490	252

### 3.1.3 Comparaison des variantes selon les impacts globaux environnementaux

Les indicateurs calculés varient linéairement suivant les longueurs des variantes de tracé. En multipliant chaque valeur d'indicateur dans le Tableau 4.1 par la longueur de chaque variante du projet étudié, on obtient la valeur d'indicateur pour chaque variante dans le Tableau 4.3. Ce qui fait la différence entre les résultats est la longueur de variante puisque des résultats unitaires pour ce projet sont obtenus avec Ecorce.

Tableau 4.3 Impacts globaux environnementaux pour des variantes de tracé

	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Variante 5
<b>Matériaux (m<sup>3</sup>)</b>	192908	164105	256019	264094	385817
<b>Energie (MJ)</b>	54600321	46447795	72463108	74748545	109200642
<b>Eau (m<sup>3</sup>)</b>	828	705	1099	1134	1657
<b>Effet de serre (kg Eq.CO<sub>2</sub>)</b>	2583615	2197849	3428859	3537003	5167231
<b>Acidification (kg Eq.SO<sub>2</sub>)</b>	7110	6048	9436	9733	14219
<b>Eutrophisation (kg Eq.PO<sub>4</sub>)</b>	454	386	603	622	908
<b>Ozone photochimique (kg Eq.éthylène)</b>	3468	2950	4602	4747	6935
<b>Ecotoxicité chronique (kg Eq. 1,4 DCB)</b>	296639	252347	393686	406103	593278
<b>Classement</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>

Le résultat est exporté dans un tableau Excel puis présenté graphiquement dans ArcGIS (par exemple Figure 4.11). Ce point permet de tester la faisabilité de ce tracé, par la suite inclure le transport des matériaux pourra induire des différences au-delà de la longueur.

Après avoir obtenu des valeurs d'indicateur avec Ecorce, on attribue à chaque variante des valeurs d'impacts environnementaux dans ArcGIS. La Figure 4.11 présente le résultat graphique concernant l'indicateur effet de serre (kg CO<sub>2</sub> équivalent).

Dans cette partie, on n'utilise aucun fond de carte car les résultats ne sont spatialisables sur l'aire d'étude car on a affaire à des indicateurs scalaires.

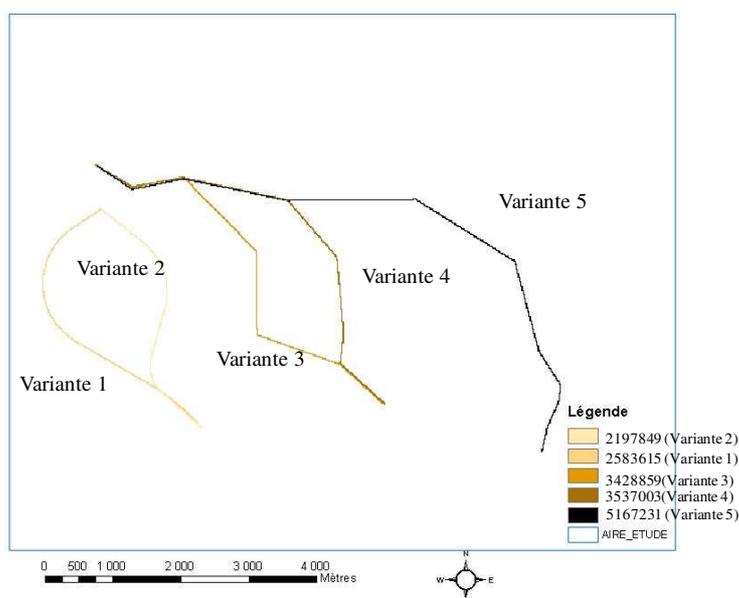


Figure 4.11 Représentation d'indicateur effet de serre (kg CO<sub>2</sub>) dans ArcGIS

### 3.1.4 Discussion – Indicateurs entrants et sortants

Le code couleur utilisé pour cette représentation ainsi que les écarts montre de manière évidente la lisibilité de ce type de tracé qui peut être soumis à des acteurs non spécialistes de l'ACV sous cette forme, même si à ce stade la linéarité des impacts est évidente.

## 3.2 Effets sur les écosystèmes – Fragmentation des écosystèmes

L'impact total de la fragmentation  $I_F$  ( $m^2$ ) est calculé in fine afin de comparer des variantes de tracé (Tableau 3.6). Ce calcul, comme vu au chapitre 3, nécessite au préalable des calculs de différents types d'indicateurs de fragmentation (aire viable, isolement, perturbation). On calcule d'abord la viabilité des écosystèmes du réseau actuel et avec l'insertion des variantes. Grâce à ces calculs, on déduit les indicateurs de fragmentation.

Dans ce paragraphe et selon la méthode proposée par Geneletti (2004), et décrite au chapitre 3, on se propose de calculer successivement 3 indicateurs pour chaque variante :

- L'aire viable ;
- L'isolement ;
- La perturbation.

### 3.2.1 Données et hypothèse de calcul

Territoire :

Dans cette partie, les résultats sont obtenus avec ArcGIS en utilisant la carte thématique « milieu naturel – habitat naturel » (cf définition dans Tableau 2.3).

La Figure 4.12 montre 6 écosystèmes de différentes formes dans l'aire d'étude. L'évaluation est réalisée sur toute l'aire d'étude afin de comparer l'impact de chaque variante (1 à 5) sur une base commune.

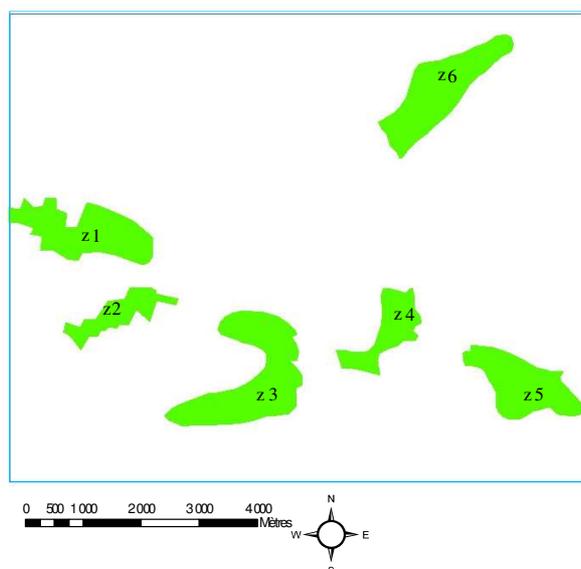


Figure 4.12 Ecosystèmes dans l'aire d'étude du projet N°1

Variantes de projet :

Les variantes de projets dont on a étudié les effets d'insertion dans les territoires concernent le projet N°1 (Figure 4.1).

Les données de calcul de la fragmentation sont les variantes de tracé et des écosystèmes. Le réseau routier actuel de l'aire d'étude est dense et il cause beaucoup de difficultés dans le calcul des indicateurs (isolement et perturbation). En effet, pour calculer l'isolement et perturbation, on doit mesurer des distances les plus faibles entre des écosystèmes et des routes. Le réseau routier divise le territoire en plusieurs parties et la recherche de ces distances devient difficilement.

On se propose une hypothèse de calcul que la comparaison des variantes de tracé dans le sens de fragmentation des écosystèmes est réalisée sans le réseau routier actuel. Cela est possible si l'on considère que le réseau routier actuel cause le même impact de fragmentation pour tous les cas de variante. On présente ci-dessous les résultats de calcul.

### 3.2.2 Résultats obtenus

Dans cette partie, on étudie l'insertion des variantes telle que nommées en Figure 4. 1

#### 3.2.2.1 Aire de l'écosystème

##### a) L'état initial (Eq.3.7)

On calcule la surface des écosystèmes. Le Tableau 4.4 présente les viabilités correspondantes aux surfaces des écosystèmes.

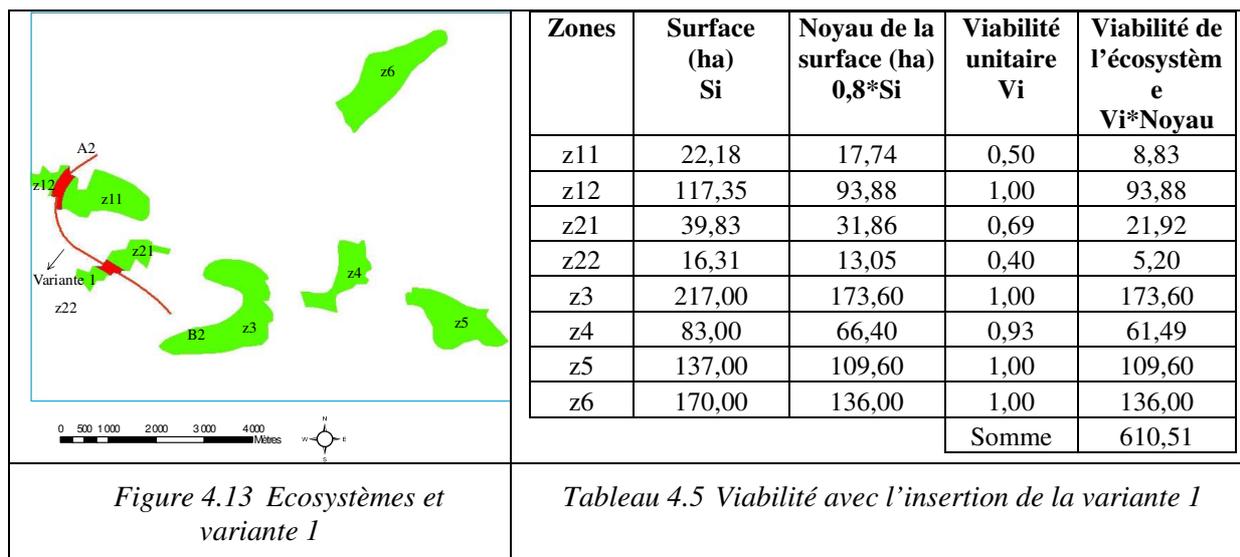
Tableau 4.4 Viabilité de l'état initial

Zones	Surface (ha) Si	Noyau de la surface (ha) $0,8*Si$	Viabilité unitaire Vi	Viabilité de l'écosystème $Vi*Noyau$
z1	158,0	126,40	1,00	126,40
z2	68,00	54,40	0,86	46,86
z3	217,00	173,60	1,00	173,60
z4	83,00	66,40	0,93	61,49
z5	137,00	109,60	1,00	109,60
z6	170,00	136,00	1,00	136,00
			Somme	653,94

Dans la dernière ligne, on fait la somme de toutes les viabilités de l'écosystème pour obtenir la viabilité totale à l'état initial du territoire étudié.

##### b) L'insertion de la variante 1 (A2\_B2) (Eq.3.8) :

On élargit la route de 100 m de part et d'autre de son axe. Cette valeur est approximative car on suppose que l'emprise d'une route est de 100 m à partir du bord de la route. On calcule l'aire viable de chaque écosystème. L'écosystème 1 est divisé en 2 zones z11 et z12, l'écosystème 2 est divisé en 2 zones z21 et z22 (Figure 4.13). Le calcul pour les autres variantes peut être réalisé sur le même principe que le calcul précédent (pour le réseau actuel).

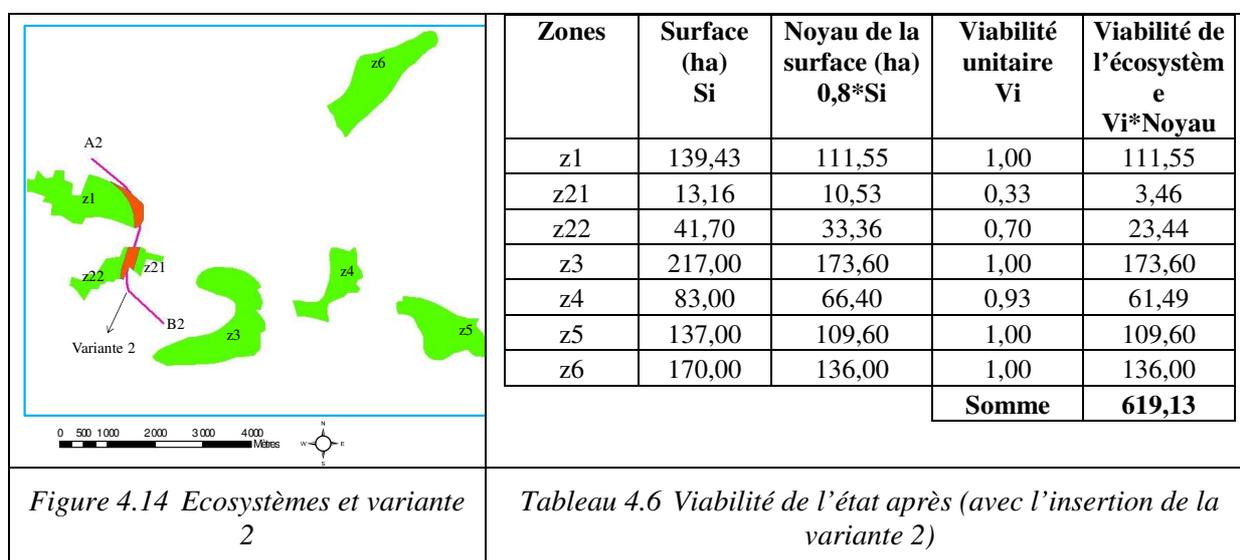


Le Tableau 4.5 présente la viabilité de ces premiers calculs pour la variante 1. On trouve que la viabilité est diminuée à cause de l'insertion de la variante 1 (610,51 par rapport à 653,94). L'impact de cet indicateur de la variante 1 est donc :

$$I_{\text{aire}} = 0,42 \times (653,94 - 610,51) = 18,24 \text{ (m}^2\text{)}$$

**c) L'insertion de la variante 2 (A2\_B2)**

Le calcul est réalisé de façon similaire à la variante 1. L'écosystème 2 est divisé en 2 zones z21 et z22 (Figure 4.14).



Le Tableau 4.6 présente la viabilité de la variante 2. L'impact de cet indicateur de la variante 2 est :

$$I_{\text{aire}} = 0,42 \times (653,94 - 619,13) = 34,81 \text{ (m}^2\text{)}$$

**d) L'insertion de la variante 3 (A1\_B1) et la variante 4**

Ces variantes de tracé ne coupent aucun écosystème (Figure 4. 15 et Figure 4.16). L'impact de ces variantes est donc similaire à l'état initial.

La valeur d'indicateur est calculée par la différence entre l'état initial et avec l'insertion de la route. L'impact de cette variante pour l'indicateur « aire viable » est donc égale à 0.

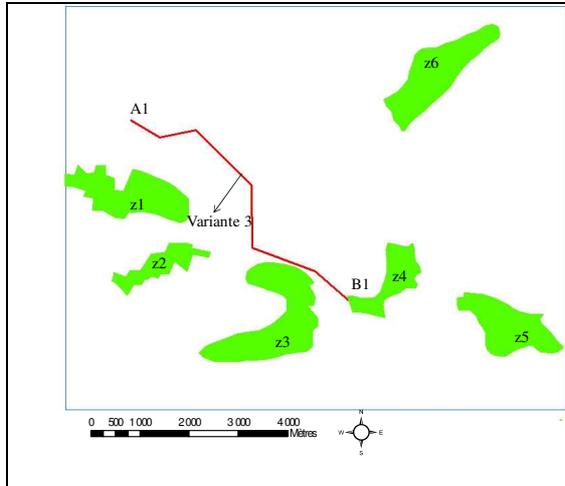


Figure 4. 15 Ecosystèmes et variante 3

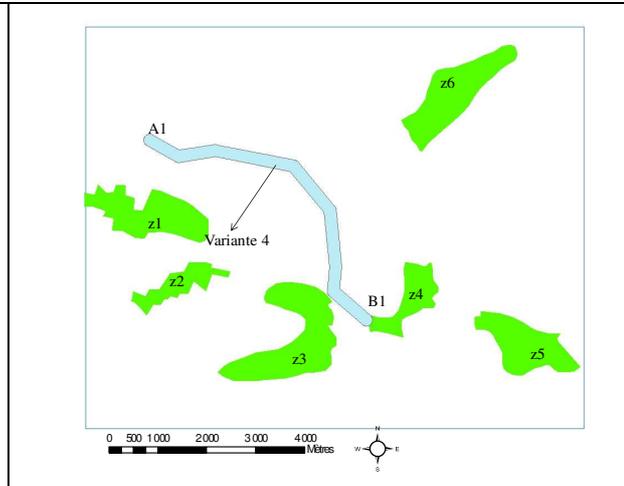


Figure 4.16 Ecosystèmes et variante 4

**e) L'insertion de la variante 5 (A1\_B3)**

Le calcul est réalisé d'une façon similaire avec la variante 1. L'écosystème 5 est divisé en 2 zones z51 et z52 (Figure 4.17).

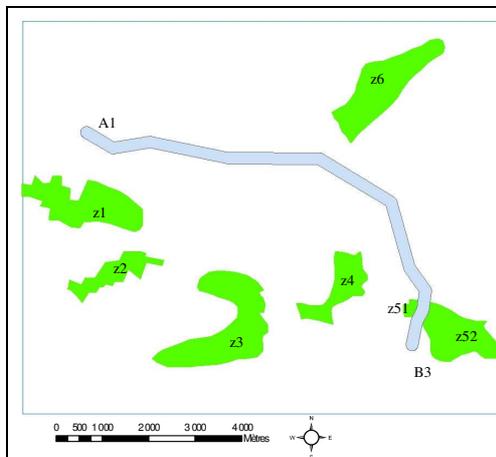


Figure 4.17 Ecosystèmes et variante 5

Zones	Surface (ha) Si	Noyau de la surface (ha) 0,8*Si	Viabilité unitaire Vi	Viabilité de l'écosystème Vi*Noyau
z1	158,00	126,40	1,00	126,40
z2	68,00	54,40	0,86	46,86
z3	217,00	173,60	1,00	173,60
z4	83,00	66,40	0,93	61,49
z51	8,15	6,52	0,17	0,00
z52	117,00	93,60	74,88	59,90
z6	170,00	136,00	1,00	136,00
			Somme	604,25

Tableau 4.7 Viabilité avec la variante 5

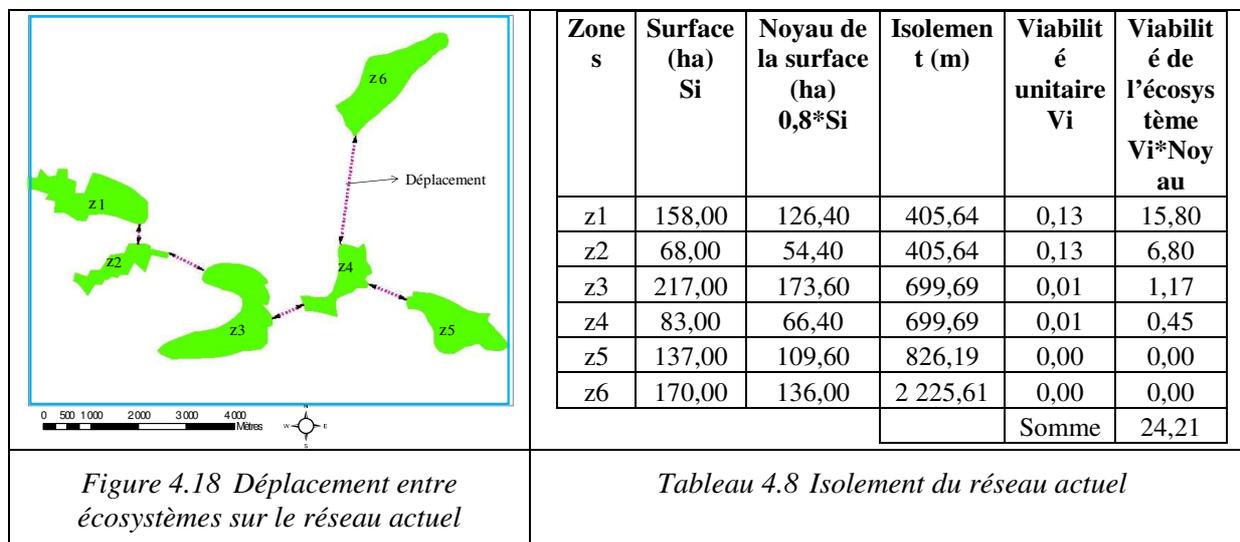
Le Tableau 4.17 présente la viabilité de la variante 5. L'impact de l'« aire viable » de la variante 5 est :

$$I_{\text{aire}} = 0,42 \times (653,94 - 604,25) = 49,70 \text{ (m}^2\text{)}$$

**3.2.2.2 Isolement des écosystèmes (Indicateur  $I_{iso}$ )**

**a) L'état initial**

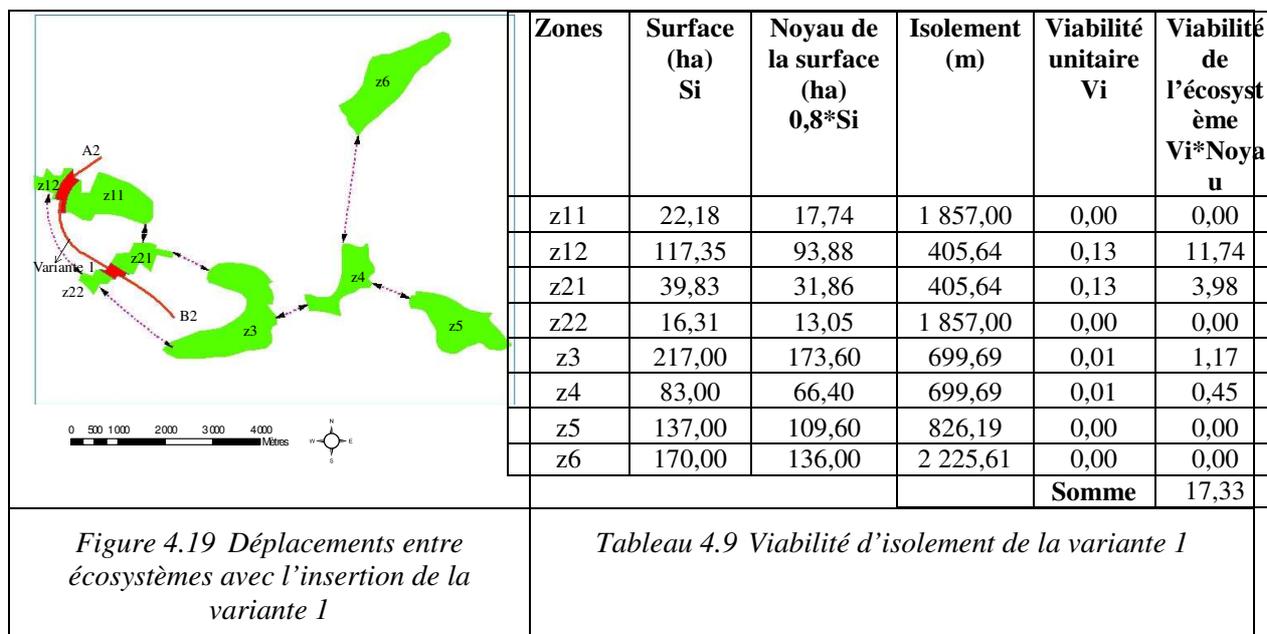
La Figure 4.18 présente les possibilités de déplacement des animaux entre 6 écosystèmes. La Figure 4.18 montre que les animaux se déplacent entre les zones (1, 2) ; (2, 3) ; (3, 4) ; (4, 5) ; (4, 6). A partir de cette carte, on calcule des distances d'isolement entre des écosystèmes.



Le Tableau 4.8 montre le calcul d'isolement de l'état initial. La viabilité totale d'isolement est de 24,21.

**b) L'insertion de la variante 1**

La Figure 4.19 présente la distribution des écosystèmes et les possibilités de déplacements sur le territoire après l'insertion de la variante 1.



Le Tableau 4.9 présente le résultat de calcul de l'impact d'isolement de la variante 1. La viabilité totale d'isolement est de 17,33. L'impact de l'isolement de la variante 1 est :

$$I_{iso} = 0,42 \times (24,21 - 17,33) = 2,89 \text{ (m}^2\text{)}$$

### c) L'insertion de la variante 2

La Figure 4.20 présente les possibilités de déplacement entre des écosystèmes sur le territoire après l'insertion de la variante 2.

	<b>Zones</b>	<b>Surface (ha) Si</b>	<b>Noyau de la surface (ha) 0,8*Si</b>	<b>Isolement (m)</b>	<b>Viabilité unitaire Vi</b>	<b>Viabilité de l'écosystème Vi*Noyau</b>
	z11	139,43	111,55	450,00	0,10	11,43
	z21	13,16	10,53	809,86	0,00	0,00
	z22	41,70	33,36	450,00	0,10	3,42
	z3	217,00	173,60	699,69	0,01	1,17
	z4	83,00	66,40	699,69	0,01	0,45
	z5	137,00	109,60	826,19	0,00	0,00
	z6	170,00	136,00	2 225,61	0,00	0,00
	<b>Somme</b>					<b>16,46</b>
<p>Figure 4.20 Déplacement entre écosystèmes avec l'insertion de la variante 2</p>		<p>Tableau 4.10 Isolement du réseau actuel et de la variante 2</p>				

Le Tableau 4.10 présente le résultat de calcul de l'impact d'isolement du réseau actuel et de la variante 2. La viabilité totale d'isolement est de 16,46. L'impact « isolement » de la variante 2 est :

$$I_{iso} = 0,42 \times (24,21 - 16,46) = 7,75 \text{ (m}^2\text{)}$$

### c) L'insertion de la variante 3 et 4

La Figure 4.21 présente les déplacements entre des écosystèmes sur le territoire après l'insertion de la variante 3. Le schéma de déplacement entre les écosystèmes est le même que celui de l'état initial. Ainsi, l'impact de cette variante pour l'indicateur « isolement » est égale à 0. La Figure 4.22 présente les déplacements entre des écosystèmes sur le territoire après l'insertion de la variante 4. Le schéma de déplacement entre les écosystèmes est le même que celui de l'état initial.

Ainsi, l'impact de cette variante pour l'indicateur « isolement » est égale à 0.

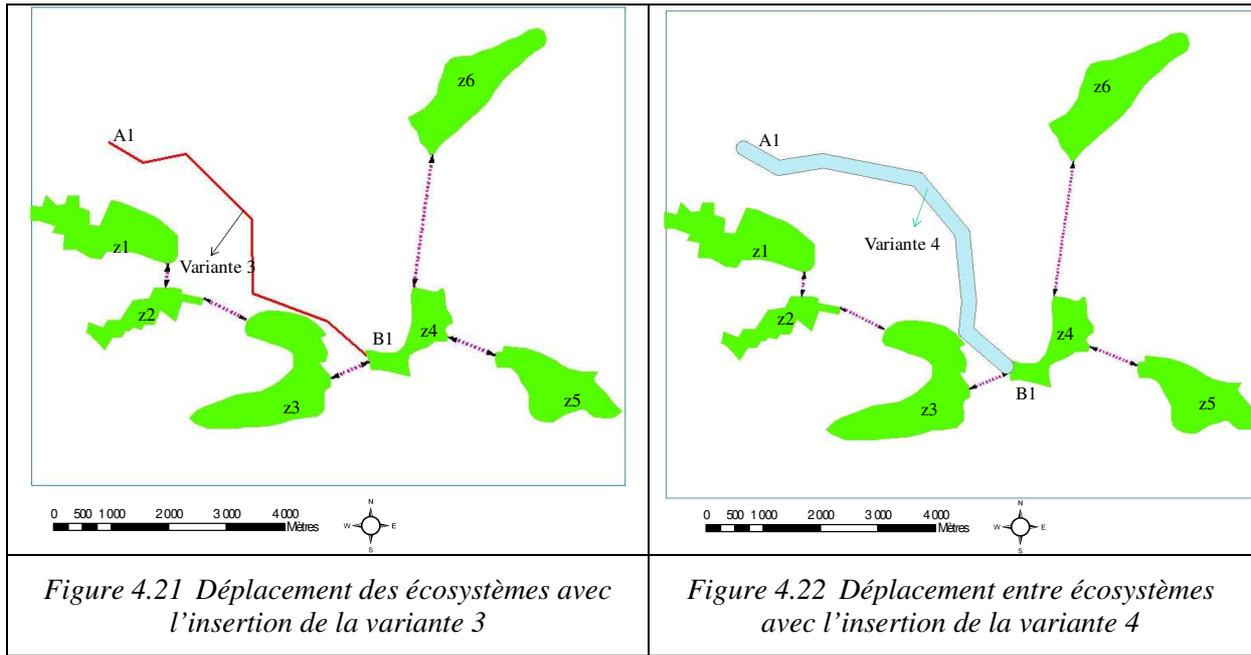


Figure 4.21 Déplacement des écosystèmes avec l'insertion de la variante 3

Figure 4.22 Déplacement entre écosystèmes avec l'insertion de la variante 4

**c) L'insertion de la variante 5**

La Figure 4.23 présente les déplacements entre des écosystèmes sur le territoire après l'insertion de la variante 5.

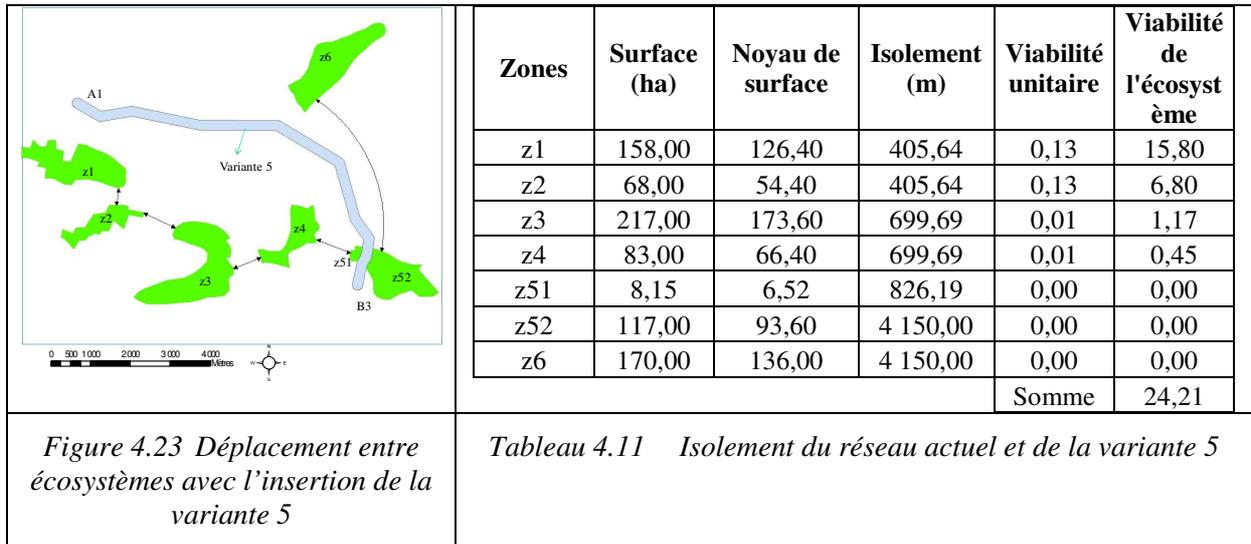


Figure 4.23 Déplacement entre écosystèmes avec l'insertion de la variante 5

Tableau 4.11 Isolement du réseau actuel et de la variante 5

Le Tableau 4.11 présente le résultat de calcul de l'impact d'isolement de la variante 5. La viabilité totale d'isolement est de 24,21. L'impact « isolement » de la variante 5 est :

$$I_{iso} = 0,42 \times (24,21 - 24,21) = 0 \text{ (m}^2\text{)}$$

**3.2.2.3 Perturbation des écosystèmes (Indicateur  $I_{\beta}$ )**

**a. L'état initial**

Il n'y a pas de la route, la valeur de viabilité unitaire est 1.

Le Tableau 4.12 présente le calcul de perturbation de l'état initial. La viabilité totale de perturbation de l'état initial est de 666,40.

Tableau 4.12 Viabilité des écosystèmes du réseau actuel selon l'indicateur « perturbation »

Zones	Surface (ha)	Noyau de surface	Viabilité unitaire	Viabilité de l'écosystème
z1	158,00	126,40	1,00	126,40
z2	68,00	54,40	1,00	54,40
z3	217,00	173,60	1,00	173,60
z4	83,00	66,40	1,00	66,40
z5	137,00	109,60	1,00	109,60
z6	170,00	136,00	1,00	136,00
Somme				666,40

### b. L'insertion de la variante 1

La Figure 4.24 présente les distances de perturbation de la variante 1.

Zones	Surface (ha)	Noyau de surface	Perturbation (m)	Viabilité unitaire	Viabilité de l'écosystème
z11	22,18	17,74	831,00	0,99	17,57
z12	117,35	93,88	241,00	0,21	19,71
z21	39,83	31,86	463,00	0,80	25,49
z22	16,31	13,05	236,00	0,20	2,60
z3	217,00	173,60	2 000,00	1,00	173,60
z4	83,00	66,40	2 000,00	1,00	66,40
z5	137,00	109,60	2 000,00	1,00	109,60
z6	170,00	136,00	2 000,00	1,00	136,00
Somme					550,98

Figure 4.24 Distances de perturbation de la variante 1

Tableau 4.13 Perturbation de la variante 1

Le Tableau 4.13 présente le résultat de calcul de la perturbation de la variante 1. La viabilité totale d'isolement est de 550,98. L'impact de « perturbation » de la variante 1 est :

$$I_{\text{per}} = 0,42 \times (666,40 - 550,98) = 115,42 \text{ (m}^2\text{)}$$

### c. L'insertion de la variante 2

La Figure 4.25 présente les distances de perturbation de la variante 2.

	<b>Zones</b>	<b>Surface (ha)</b>	<b>Noyau de surface</b>	<b>Perturbation (m)</b>	<b>Viabilité unitaire</b>	<b>Viabilité de l'écosystème</b>
	z1	139,43	111,55	708,00	0,94	104,85
	z21	13,16	10,53	161,00	0,12	1,26
	z22	41,70	33,36	325,00	0,42	14,01
	z3	217,00	173,60	2 000,00	1,00	173,60
	z4	83,00	66,40	2 000,00	1,00	66,40
	z5	137,00	109,60	2 000,00	1,00	109,60
	z6	170,00	136,00	2 000,00	1,00	136,00
					<b>Somme</b>	<b>605,73</b>
<p>Figure 4.25 Distances de perturbation de la variante 2</p>		<p>Tableau 4.14 Perturbation de la variante 2</p>				

Le Tableau 4.14 présente le résultat de calcul de la perturbation de la variante 2. La viabilité totale d'isolement est de 605,73. L'impact de « perturbation » de la variante 2 est :

$$I_{per} = 0,42 \times (666,40 - 605,73) = 60,67 \text{ (m}^2\text{)}$$

**d. L'insertion de la variante 3**

La Figure 4.26 présente les distances de perturbation de la variante 3.

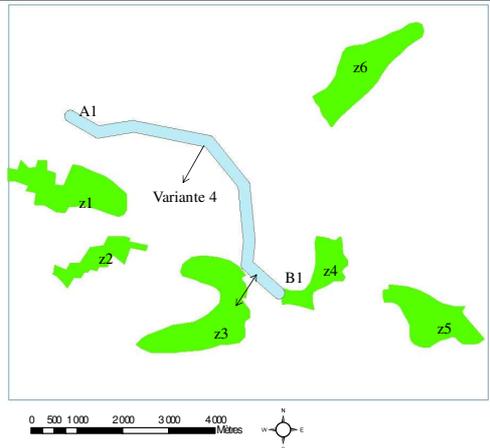
	<b>Zones</b>	<b>Surface (ha)</b>	<b>Noyau de surface</b>	<b>Perturbation (m)</b>	<b>Viabilité unitaire</b>	<b>Viabilité de l'écosystème</b>
	z1	158,00	126,40		1,00	126,40
	z2	68,00	54,40		1,00	54,40
	z3	217,00	173,60	760,00	0,95	164,92
	z4	83,00	66,40		1,00	66,40
	z5	137,00	109,60		1,00	109,60
	z6	170,00	136,00		1,00	136,00
						<b>Somme</b>
<p>Figure 4.26 Distances de perturbation de la variante 3</p>		<p>Tableau 4.15 Perturbation de la variante 3</p>				

Le Tableau 4.15 présente le résultat de calcul de la perturbation de la variante 3. La viabilité totale d'isolement est de 657,72. L'impact de l'indicateur « perturbation » de la variante 3 est :

$$I_{per} = 0,42 \times (666,40 - 657,72) = 8,68 \text{ (m}^2\text{)}$$

**e. L'insertion de la variante 4**

La Figure 4.27 présente les distances de perturbation de la variante 4.

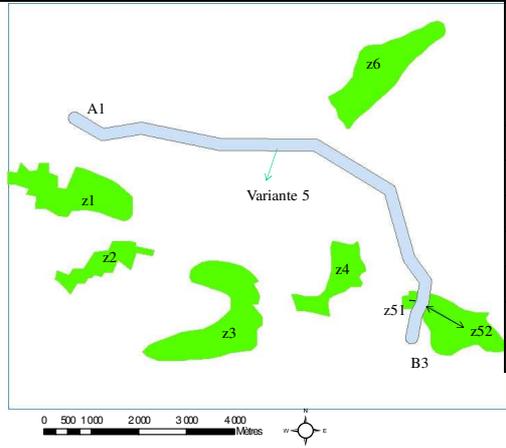
	<b>Zones</b>	<b>Surface (ha)</b>	<b>Noyau de surface</b>	<b>Perturbation (m)</b>	<b>Viabilité unitaire</b>	<b>Viabilité de l'écosystème</b>
	z1	158,00	126,40	2 000,00	1,00	126,40
	z2	68,00	54,40	2 000,00	1,00	54,40
	z3	217,00	173,60	760,00	0,95	164,92
	z4	83,00	66,40	2 000,00	1,00	66,40
	z5	137,00	109,60	2 000,00	1,00	109,60
	z6	170,00	136,00	2 000,00	1,00	136,00
						<b>Somme</b>
<i>Figure 4.27 Distances de perturbation de la variante 4</i>		<i>Tableau 4.16 Perturbation de la variante 4</i>				

Le Tableau 4.16 présente le résultat de calcul de la perturbation de la variante 4. La viabilité totale d'isolement est de 657,72. L'impact de l'indicateur « perturbation » de la variante 4 est :

$$I_{per} = 0,42 \times (666,40 - 657,72) = 8,68 \text{ (m}^2\text{)}$$

#### f. L'insertion de la variante 5

La Figure 4.28 présente les distances de perturbation de la variante 5.

	<b>Zones</b>	<b>Surface (ha)</b>	<b>Noyau de surface</b>	<b>Perturbation (m)</b>	<b>Viabilité unitaire</b>	<b>Viabilité de l'écosystème</b>
	z1	158,00	126,40		1,00	126,40
	z2	68,00	54,40		1,00	54,40
	z3	217,00	173,60	760,00	0,95	164,92
	z4	83,00	66,40		1,00	66,40
	z51	8,15	6,52	141,00	0,12	0,78
	z52	117,00	93,60	685,00	0,90	84,24
	z6	170,00	136,00		1,00	136,00
						<b>Somme</b>
<i>Figure 4.28 Distances de perturbation de la variante 5</i>		<i>Tableau 4.17 Perturbation de la variante 5</i>				

Le Tableau 4.17 présente le résultat de calcul de la perturbation de la variante 5. La viabilité totale d'isolement est de 633,14. L'impact de l'indicateur « perturbation » de la variante 5 est :

$$I_{per} = 0,42 \times (666,40 - 633,14) = 33,26 \text{ (m}^2\text{)}$$

### 3.2.3 Comparaison des variantes suivant l'indicateur $I_F$

En utilisant la formule de combinaison de trois indicateurs « aire viable, isolement, perturbation » :  $I_F = I_{aire} + I_{iso} + I_{per}$ , on obtient le résultat ci-dessous :

L'impact total de la variante 1 est :  $I_{Fva1} = 136,56 \text{ (m}^2\text{)}$

L'impact total de la variante 2 est :  $I_{Fva2} = 103,23 \text{ (m}^2\text{)}$

L'impact total de la variante 3 est :  $I_{Fva3} = 8,68 \text{ (m}^2\text{)}$

L'impact total de la variante 4 est :  $I_{Fva4} = 8,68 \text{ (m}^2\text{)}$

L'impact total de la variante 5 est :  $I_{Fva5} = 82,95 \text{ (m}^2\text{)}$

Les variantes 3 et 4 sont les plus favorables pour cet indicateur.

Le Tableau 4.18 présente le classement des variantes de tracé :

Tableau 4.18 Classement des variantes de tracé par l'indicateur « effet sur les écosystèmes-fragmentation du territoire »

	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Variante 5
Classement	5	4	1	1	3

### 3.3 Effets sur la sécurité et circulation-crétion des intersections

L'indicateur attendu est nombre de carrefours  $N_c$  (sans unité). Le résultat est fourni graphiquement pour chaque variante. Une variante ayant plus de carrefours devient défavorable par rapport à d'autres parce que cela demande plus le cout de construction, cela cause de l'insécurité aux voyageurs.

#### 3.3.1 Données de calcul

Les données de calcul concernent le réseau routier actuel (nom de la carte : route.shp) dans l'aire d'étude et les nouvelles variantes de tracé proposées (nom de la carte : variante1.shp, variante2.shp,...). Dans cette partie, les résultats sont obtenus avec ArcGIS en utilisant la carte thématique « zone d'urbanisme – réseau routier » (Tableau 2.5).

#### 3.3.2 Résultat obtenu

Lors de l'insertion de nouvelles variantes de tracé, de nouveaux carrefours sont créés. Les carrefours sont les points affichés dans la Figure 4.29.

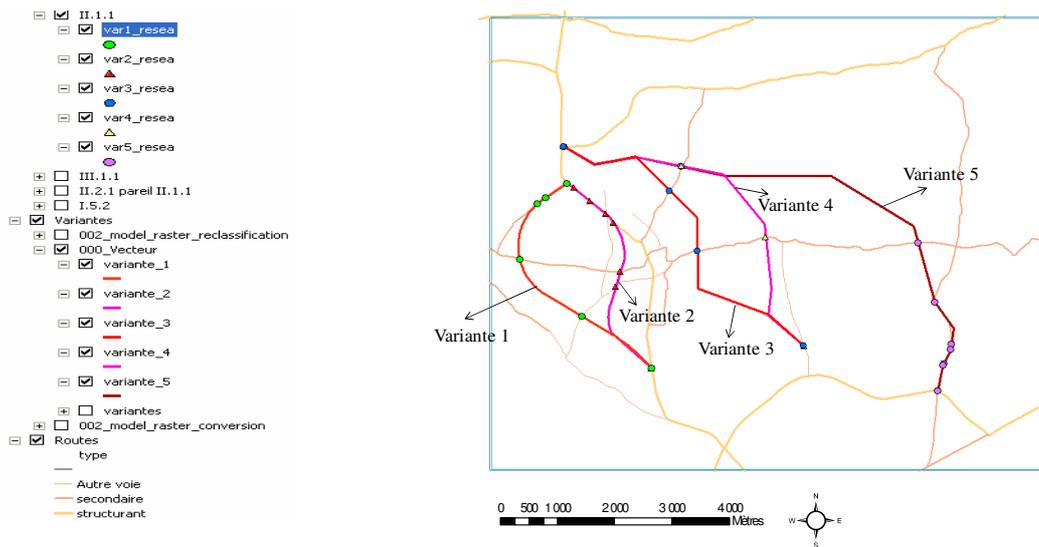


Figure 4.29 Carrefours créés par de nouvelles routes

### 3.3.3 Comparaison des variantes selon l'indicateur $N_C$

La variante de tracé qui présente le nombre de carrefour le plus faible (4) est considéré comme la meilleure variante selon ce critère. Elle est donc classée en premier. On constate également de nombre de carrefours élevés pour la variante 5.

Le Tableau 4.19 montre le bilan des résultats :

Tableau 4.19 Nombre de carrefours

	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Variante 5
<b>Nombre de carrefours créés</b>	6	8	4	4	9
<b>Classement</b>	3	4	1	1	5

## 3.4 Effet sur le patrimoine bâti sur le milieu naturel et les espaces disponibles

Les résultats attendus sont les longueurs de chaque variante qui coupent chaque zone sensible matérialisée par un cercle au tour.

L'indicateur attendu est la longueur de coupure  $L_c$  (m) de la zone sensible.

### 3.4.1 Données de calcul

Dans cette partie, les résultats sont obtenus avec ArcGIS en utilisant la carte thématique « patrimoine – patrimoine culturel » (Tableau 2.6).

Une zone « patrimoine » est une zone protégée et son périmètre de protection est de 500 m. En utilisant la fonction « zone tampon » dans Spatial Analyst (S.A), on crée des cercles de rayon de 500 m autour des zones « patrimoines » en Figure 4.30. On cherche ensuite les longueurs d'intersection de ces surfaces de cercles avec des variantes de tracé. Sur la Figure 4.30, seules variantes ( $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_5$ ) traversent des zones patrimoines.

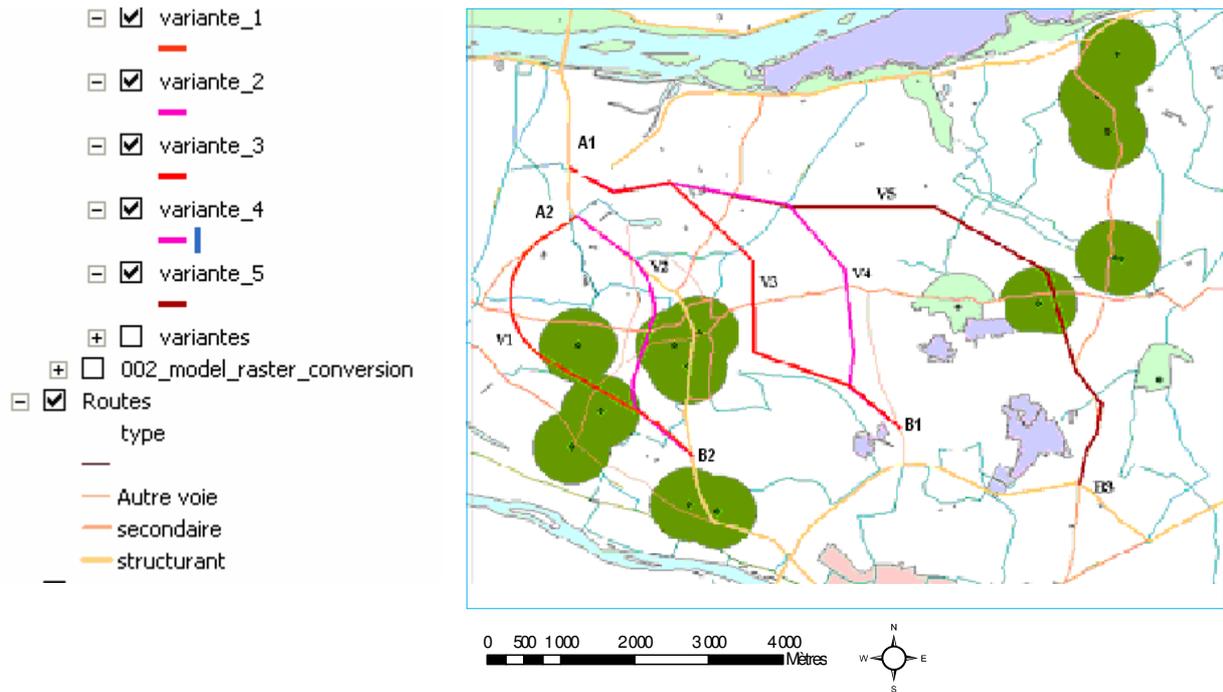


Figure 4.30 Variantes et patrimoines

### 3.4.2 Résultat obtenu

La Figure 4.31 présente le résultat de calcul de cet indicateur qui se matérialise par des longueurs de coupure qui varient de 0 à 1 480 m. Les variantes 3 et 4 ne traversent pas de périmètres de patrimoine. Ce sont les meilleures variantes au sens de cet indicateur. La variante V<sub>1</sub> traverse des zones patrimoniales sur 1,48 km. Les 2 autres sur moins de 1 km.

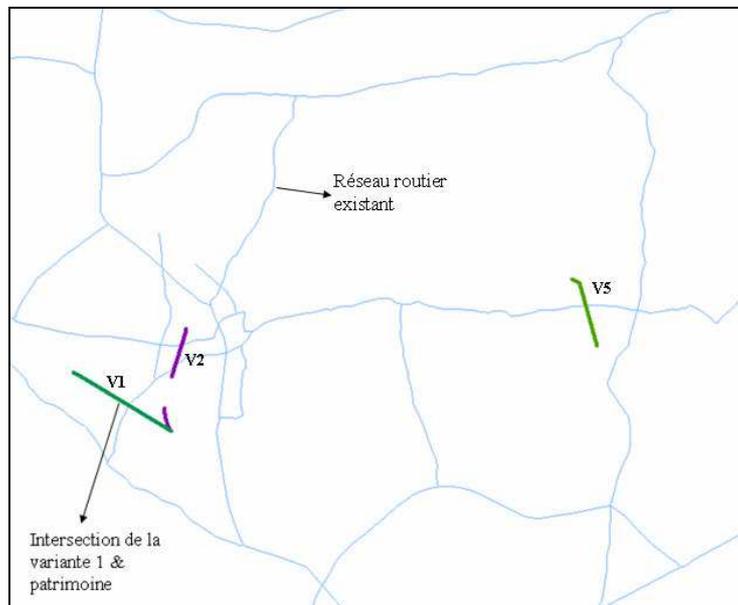


Figure 4.31 Intersection des variantes et patrimoines

### 3.4.3 Comparaison des variantes selon l'indicateur $L_C$

Le Tableau 4.20 récapitule les résultats de longueur de coupure de chaque variante de tracé :

Tableau 4.20 Bilan de calcul de l'indicateur « longueur de coupure »

	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Variante 5
<b>Longueur totale de la variante (m)</b>	4802	4085	6373	6574	9604
<b>Longueur de coupure(m)</b>	<b>1480</b>	<b>990</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>954</b>
<b>Taux d'intersection (%)</b>	31	24	0	0	10
<b>Classement</b>	5	4	1	1	3

Le taux d'intersection (rapport de la longueur de coupure à la longueur totale de la variante) avec des zones patrimoniales est de 31%, 24% et 10% respectivement pour les variantes  $V_1$ ,  $V_2$  et  $V_5$ .

Ce type d'indicateur peut être appliqué à plusieurs problématiques (la route traverse des zones inondables, des forêts, des zones agricoles, ...). On obtiendra si on souhaite effectuer de tels calculs plusieurs tableaux de comparaison comme le Tableau 4.20 par des calculs similaires. Ces résultats peuvent être utilisés pour la comparaison des variantes.

Dans ce cas de cet indicateur et si on utilise ici notion de classement pour comparer les variantes, on ne traduit pas l'écart considérable de coupure entre  $V_1$  et  $V_5$ .

### 3.5 Nuisance sonore

L'indicateur de calcul est la longueur de façade du bâtiment  $L_F$  (en mètres) ou le nombre de bâtiments ou d'habitants exposés aux nuisances sonores (supérieurs à la sonore admissible)  $N_F$ . Le résultat est fourni graphiquement pour chaque variante (Annexe 5).

#### 3.5.1 Données de calcul

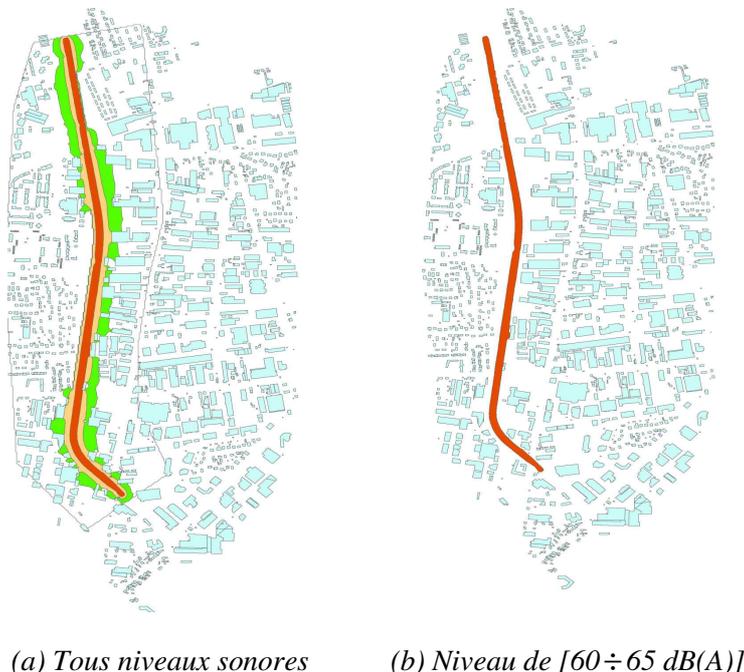
L'échelle de calcul du projet N°1 n'est pas précisée pour le calcul des nuisances sonores (échelle 1/25000), et il n'a pas été possible de recueillir des données (zones de bâtiments, hauteurs des bâtiments). On calcule donc cet indicateur pour 2 autres projets (projet N°3 et N°4). Le projet N°3 présente le calcul pour 1 variante de tracé. Le projet N°4 se compose de 3 variantes.

Les données nécessaires aux calculs sont : topographie (courbes de niveaux), bâtiments, et trafic. Dans ce cas, on n'a qu'une seule variante de tracé et on calcule des isophones pour cette variante.

#### 3.5.2 Résultat de calcul

##### a) Indicateur « longueur de façade impactée » pour le projet N°3

Des courbes d'isophones sont calculées en utilisant le logiciel SoundPlan. De plus, si on peut calculer ce cas (pour 1 variante de tracé), on arrivera à traiter pour l'autre projet avec de différentes variantes de tracé. La Figure 4.32 présente les résultats pour différents niveaux sonores.





(c) Niveau de  $[55 \div 60 \text{ dB(A)}]$       (d) Niveau de  $[55 \div 60 \text{ dB(A)}]$

Figure 4.32 Courbes d'isophones sous ArcGIS

L'indicateur « nuisance sonore » est utilisé pour évaluer des bruits que les habitants subissent. Il faut donc calculer le nombre d'habitants dans des zones sonores de  $[50 \div 55 \text{ dB(A)}]$ ,  $[55 \div 60 \text{ dB(A)}]$ ,  $[60 \div 65 \text{ dB(A)}]$ . Le calcul se fait pour la période nocturne. Toutefois, pour réaliser ce travail, il faut étudier chaque logement pour compter le nombre d'habitants dedans. Pour gagner du temps, on traite donc les résultats avec un indicateur simple : longueur de façade en contact avec un niveau sonore donné. Cet indicateur sera transformé en surface de contact si l'on ajoute des hauteurs des bâtiments aux données.

L'intersection entre les surfaces des bâtiments et les isophones est réalisée.

Le résultat de calcul des longueurs de façade de bruit pour chaque niveau sonore est présenté dans l'annexe 5.

La longueur des façades des bâtiments subissant le niveau de 64 dBA est de 23,3 m.

La longueur des façades des bâtiments subissant le niveau de 59 dBA est de 449,8 m

La longueur des façades des bâtiments subissant le niveau de 54 dBA est de 1328,6 m

Le Tableau 4.21 présente le résultat de calcul :

Tableau 4.21 Longueurs de façade impacté au bruit de la variante 1

Longueur de façade à chaque niveau	64 dB(A)	59 dB(A)	54 dB(A)
Variante 1 (m)	23,3	449,8	1328,6

**b) Indicateur : Nombre d'habitant exposé à un niveau sonore de référence pour le projet N°4**

Dans cette partie, les résultats d'isophones obtenus par Soundplan sont importés dans ArcGIS sur la carte thématique « urbanisme – zone d'habitation » (Tableau 2.5). La Figure 4.33 présente les nuisances sonores engendrées par la 1<sup>ère</sup> variante de tracé. La Figure 4.34 présente la zone de nuisances sonores  $\geq 55$  dB(A) engendrées par la 1<sup>ère</sup> variante de tracé.

Les calculs de bruit pour les zones de nuisances sonores ( $\geq 60$  dB(A) ;  $\geq 65$  dB(A) ;  $\geq 70$  dB(A)) sont réalisés.

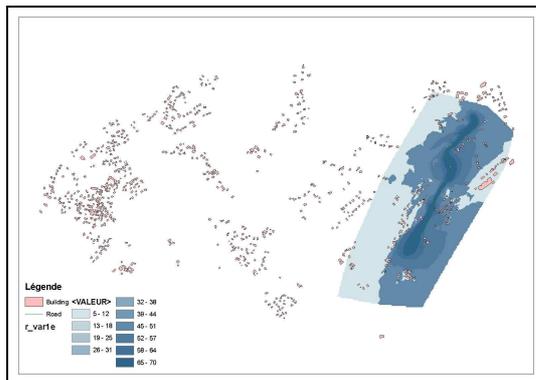


Figure 4.33 Nuisances sonores engendrées par la 1<sup>ère</sup> variante de tracé

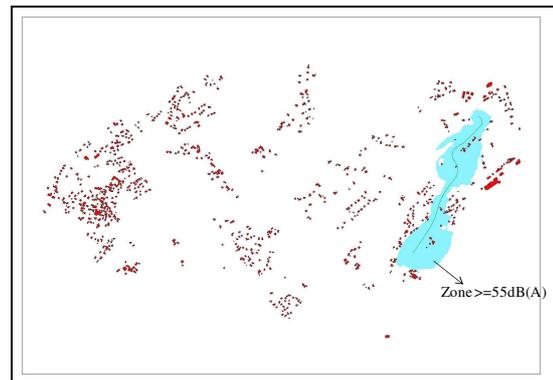


Figure 4.34 Zone de nuisances sonores  $\geq 55$  dB(A) engendrés par la 1<sup>ère</sup> variante de tracé

La Figure 4.35 présente les nuisances sonores engendrées par la 2<sup>ème</sup> variante de tracé. La Figure 4.36 présente la zone de nuisances sonores  $\geq 55$  dB(A) engendrées par la 2<sup>ème</sup> variante de tracé.

Les calculs pour les zones de nuisances sonores ( $\geq 60$  dB(A) ;  $\geq 65$  dB(A) ;  $\geq 70$  dB(A)) sont réalisés d'une façon similaire à la variante 1.

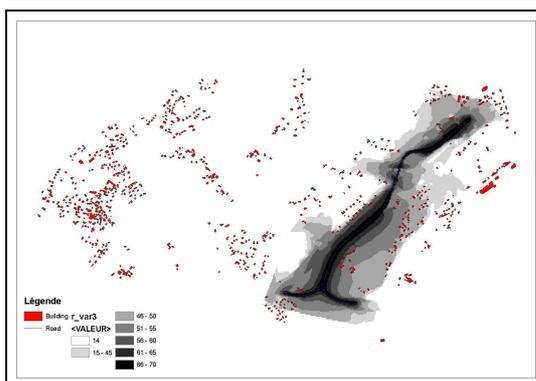


Figure 4.35 Nuisances sonores engendrés par la 2<sup>ème</sup> variante de tracé

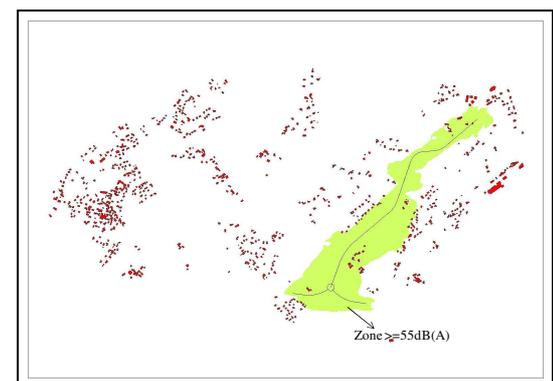


Figure 4.36 Zone de nuisances sonores  $\geq 55$  dB(A) engendrés par la 2<sup>ème</sup> variante de tracé

La Figure 4.37 présente les nuisances sonores engendrées par la 3<sup>ème</sup> variante de tracé. La Figure 4.38 présente la zone de nuisances sonores  $\geq 55$  dB(A) engendrées par la 3<sup>ème</sup> variante de tracé.

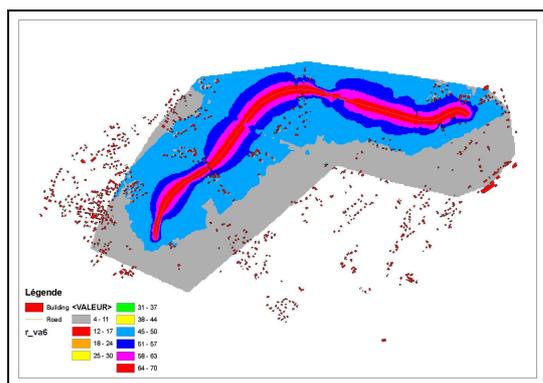


Figure 4.37 Nuisances sonores engendrées par la 3ème variante de tracé

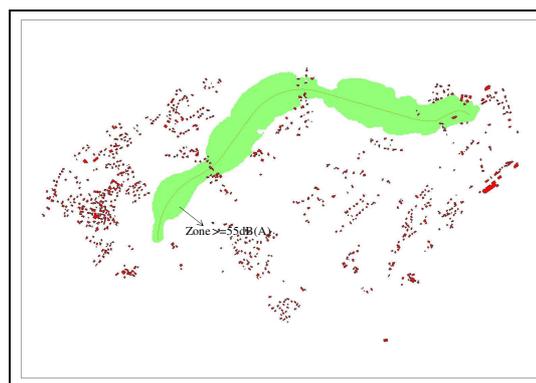


Figure 4.38 Zone de nuisances sonores  $\geq 55$  dB(A) engendrées par la 3ème variante de tracé

Les calculs pour les zones de nuisances sonores (60 dB(A) ; 65 dB(A) ;  $\geq 70$  dB(A)) sont réalisés de la même façon pour la variante 3. On obtient dans le Tableau 4.22 le résultat sur le nombre de bâtiments de chaque variante de tracé.

Tableau 4.22 Nombre de bâtiments touchés

	$\geq 50$ dB(A)	55 dB(A)	60 dB(A)	65 dB(A)	70 dB(A)
Variante 1	82	38	7	4	2
Variante 2	180	70	27	7	1
Variante 3	161	73	29	9	1

### 3.5.3 Comparaison des variantes selon l'indicateur « nuisance sonore »

On déduit le nombre de bâtiments dans chaque intervalle de niveau sonore [50 dBA ; 55 dBA) ; [55 dBA ; 60 dBA) ; [60 dBA ; 65 dBA) ; [65 dBA ; 70 dBA]. Le Tableau 4.23 présente ce résultat. D'après le Tableau 4.23, on trouve que la variante 1 cause moins d'impact sonore aux habitants par rapport aux autres variantes car le nombre de bâtiments dans chaque zone de niveau sonore est toujours faible.

Tableau 4.23 Nombre de bâtiments dans chaque intervalle de nuisance sonore

Intervalle dB(A)	50-60	55-60	60-65	65-70	>70	Classement
Variante 1	31	3	2	2	2	1
Variante 2	43	20	6	1	1	2
Variante 3	44	20	8	1	1	3

## 3.6 Facilité de cheminement

Le résultat attendu est une évaluation de la facilité de cheminement (Tableau 3.6) entre un point-origine et un point-destination, se trouvant typiquement être les points à relier grâce aux variantes de tracé. L'évaluation et la comparaison des variantes se font sur la base de la valeur de l'indicateur  $C_p$  qui peut prendre, en fonction de la signification de la variable  $Fi$ , la dimension d'une distance (dimension [L]), d'un temps de parcours (dimension (T)) ou d'un coût du trajet, soit en termes monétaire, soit en terme de ressources énergétique consommée ou directement d'énergie (dimension [J] dans ce dernier cas).

Dans cette évaluation, les connections des projets de variantes avec le réseau existant sont prises en compte. D'une part parce que la méthode de calcul est capable de prendre en compte le fait qu'un utilisateur partira d'un point qui ne se trouve pas forcément sur le tracé de la variante (prise en compte du trajet et temps de jonction avec la variante) et de la même façon, que sa destination ne sera pas forcément juste sur le tracé de la variante. D'autre part, parce que, il peut se trouver que pour tout ou partie, le trajet optimum du point de vue du critère  $C_p$ , ne passe pas forcément par la variante proposée. Cet angle d'évaluation permet de tester la pertinence de la variante par rapport au réseau préexistant.

### 3.6.1 Données de calcul

Compte tenu de l'intérêt premier des décideurs et utilisateurs, l'évaluation est pratiquée dans ce cas d'étude du point de vue du temps de parcours estimé par l'indicateur  $C_p$ .

Les données nécessaires au calcul sur l'aire d'étude sont :

- La structure du réseau routier existant ;
- Les tracés des variantes de tracés ;
- La vitesse moyenne des véhicules sur les différents types de voirie ;
- Les coordonnées du point de départ et point d'arrivée.

Les vitesses moyennes des voitures sur le réseau sont supposées valoir :

- Sur les routes structurantes :  $V = 80$  km/h (ce qui est le cas notamment des variantes du projet routier) ;
- Sur les routes secondaires pré-existantes :  $V = 60$  km/h ;
- Sur les autres voies :  $V = 40$  km/h (circulation dans les bourgs notamment)

On suppose donc que la vitesse de conception du nouveau tracé (section neuve) est  $V = 80$  km/h

### 3.6.2 Résultats

#### 3.6.2.1 Etat initial de l'aire d'étude

Les données initiales de l'aire d'étude permettent d'évaluer le cheminement du point A (point de départ du projet envisagé) au point B (point d'arrivée le plus distant du projet envisagé). Les points sont matérialisés sur la figure 4.39. On rappelle qu'une caractéristique importante du projet N°1 est de relier une traversée de bourg (point A) à une route sur laquelle différents points de connexion peuvent être envisagés (cf. Chapitre 1).





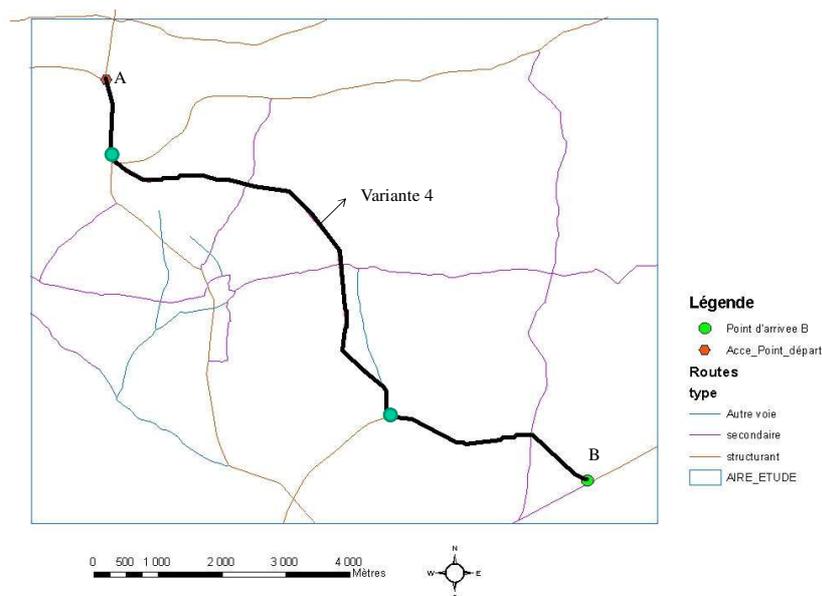


Figure 4.42 Cheminement AB le plus rapide après la réalisation de la variante 4

### 3.6.2.5 Cheminement optimum grâce à la variante 5

La Figure 4.43 présente le résultat de calcul du cheminement optimal en présence de la variante 5. On constate qu'il emprunte une section importante de la nouvelle variante 5.

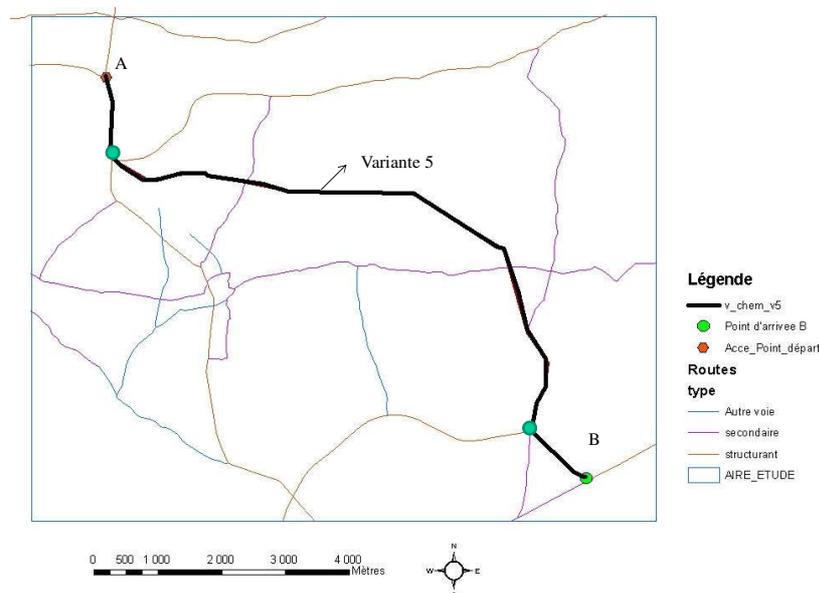


Figure 4.43 Cheminement AB le plus rapide après la réalisation de la variante 5

## 3.6.3 Comparaison des variantes selon l'indicateur $I_p$

### 3.6.3.1 Cheminement du point A au point B

Les cheminement optimum calculés du point A au point B dans chaque situation (réseau existant et 5 variantes) sont comparés ci-dessous en termes de (Tableau 4.24.) :

- Temps de parcours ;

- Distance parcourue (somme des sections empruntées).

Tableau 4.24 Longueur et « coût » de chaque variante de tracé

Critères	Unités	Réseau					
		Pré-existant	Avec Variante 1	Avec Variante 2	Avec Variante 3	Avec Variante 4	Avec Variante 5
Temps de parcours	min	10'48''	10'48''	10'48''	9'16''	9'40''	9'59''
Gain de temps	min	-	0	0	1'32''	1'08''	0'49''
Distance parcourue	m	13 630	13 630	13 630	11 725	11 934	12 033
Usage de la variante	m	-	0	0	6373	6574	9604
Part de linéaire utilisée	%	-	0	0	54	55	80
Classement		-	4	4	1	2	3

Les cheminements optimaux en présence des variantes 1 ou 2 ou en l'absence de nouvelle section sont rigoureusement identiques. Ce qui classe les projets de variantes 1 et 2 au dernier rang du point de vue de leur intérêt sur le critère Cp. Le gain de temps est maximal grâce à la variante 3. Cette dernière est utilisée sur une section de 6373 mètres pour permettre le cheminement optimal. Les variantes 4 et 5 permettent aussi des gains de temps et sont utilisées respectivement sur des sections de 6574 et 9604 mètres, ce qui représente respectivement 55% et 80% de leur linéaire. Pour la variante 3, cette part de linéaire est de 54%.

Le point-destination (B) se trouvant au sud-est de la zone d'étude, la configuration du réseau pré-existant est défavorable à l'expression d'un intérêt des variantes 1 et 2, situées à l'ouest de la zone, par rapport aux variantes 3, 4 et 5.

### 3.6.3.2 Cheminement du point A au point C

Afin de comparer de façon plus complète l'intérêt de chaque variante, l'évaluation a été conduite aussi vis-à-vis du point C se situant à au sud-ouest, sur la voie structurante au sud de la zone d'étude. Le processus de calcul est similaire au calcul précédent. La Figure 4.44 présente le résultat de calcul du cheminement optimal du point A au point C. On trouve que dans tous les cas d'aménagement de variantes (en couleur sur la figure), l'itinéraire est le même que celui empruntant le réseau existant : aucune des 5 variantes ne procure de gain de temps entre les points A et C.

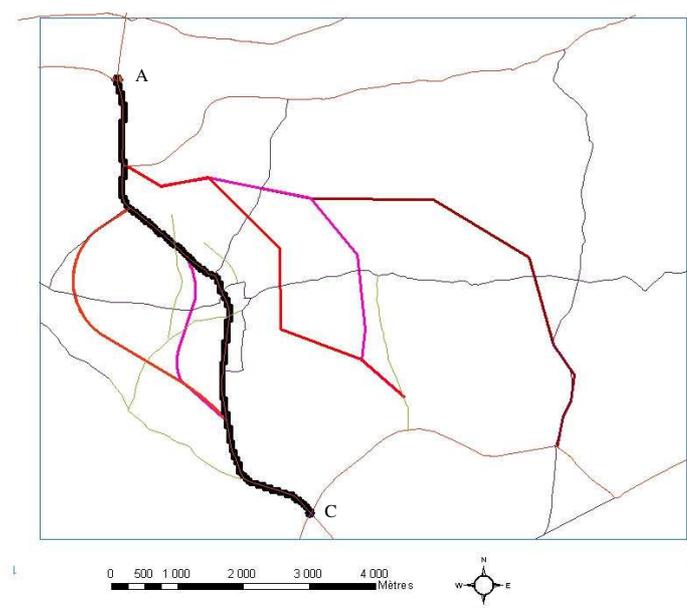


Figure 4.44 Cheminement AC le plus rapide avec toutes les variantes

Le temps de parcours et la distance parcourue sont plus faibles que sur le trajet AB, mais aucun gain quantitatif n'apparaît par rapport à la situation préexistante en termes de temps de parcours et de distance (Tableau 4.25).

Tableau 4.25 Longueur et « coût » de chaque variante de tracé

Critères	Unités	Réseau					
		Pré-existant	Avec Variante 1	Avec Variante 2	Avec Variante 3	Avec Variante 4	Avec Variante 5
Temps de parcours	min	6'35''	6'35''	6'35''	6'35''	6'35''	6'35''
Gain de temps	min	-	0	0	0	0	0
Distance parcourue	m	8 116	8 116	8 116	8 116	8 116	8 116
Usage de la variante	m	-	0	0	0	0	0
Classement		-	-	-	-	-	-

## 3.7 Prélèvement d'emprise

### 3.7.1 Données et hypothèse de calcul

Dans cette partie, les résultats sont obtenus avec ArcGIS en utilisant la carte « zone d'urbanisme – zone d'habitat » (Tableau 2.5).

### 3.7.2 Résultats obtenus

Les résultats attendus sont des surfaces d'emprise de chaque variante qui traverse les zones sensibles. L'indicateur attendu est la surface d'emprise totale  $S_E$  (m<sup>2</sup>).

En utilisant la fonction d'intersection des objets dans ArcGIS, on obtient le résultat qui est représenté sous la carte en Figure 4.45. Sur cette figure, on observe des maisons (des polygones) dans une zone de 200 m de part et d'autre de chaque variante.

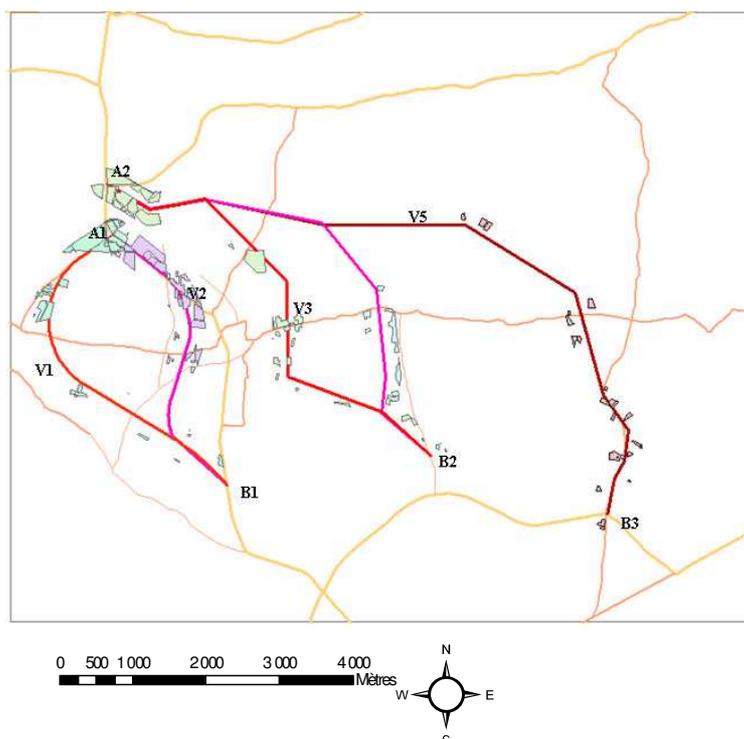


Figure 4.45 Zones d'habitat des bâtiments de 200m de la route

### 3.7.3 Comparaison des variantes selon l'indicateur longueur de coupure équivalente

Le Tableau 4.26 présente le bilan des résultats obtenus. Ici, on introduit un paramètre appelée « longueur de coupure équivalente » qui donne une vue globale sur la longueur totale de la variante et la longueur traversant la zone sensible.

La longueur de coupure équivalente est calculée par la formule :

$$L_{eq} = \text{Surface de coupure} / (\text{largeur de la zone de proximité})$$

$$\text{Largeur de la zone de proximité} = 2 \times 200 = 400 \text{ m}$$

Tableau 4.26 Bilan de résultat

	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Variante 5
Longueur de la variante (m)	4802	4085	6373	6574	9604
Surface de coupure (km <sup>2</sup> )	0,27	0,37	0,38	0,31	0,32
Longueur de coupure équivalente (m)	673	918	942	784	804
% coupure (%)	14	22	15	12	8
Classement	3	5	4	2	1

## 3.8 Rayonnement

### 3.8.1 Données et hypothèse de calcul

Les données de calcul sont le réseau routier actuel, de variantes de tracé, la carte de sensibilité du territoire, zones d'habitation. Les résultats sont obtenus à partir de la carte thématique « zone d'urbanisme-zone d'habitat » (Tableau 2.5). Les zones de destination prises en compte dans ce cas d'étude sont les zones d'intérêt patrimonial.

### 3.8.2 Résultats

A partir des cartes de calcul du rayonnement généralisé avant (état initial) et après aménagement (introduction d'un nouveau tronçon de route), on évalue la surface d'avantages dans l'objectif de rayonnement : indicateur  $S_r$  (m<sup>2</sup>). La variante offrant la plus grande surface d'avantage de rayonnement est la meilleure solution selon cet objectif. Les calculs sont réalisés pour toutes les variantes.

#### 3.8.2.1 Etat initial

La Figure 4. 46 présente la carte du rayonnement généralisé initial en fonction du réseau de routes préexistant. Avec ArcGIS, cette carte sera soustraite aux cartes de rayonnement calculées avec chaque variante, afin de faire apparaître les surfaces de gain de rayonnement ( $S_r$ ).

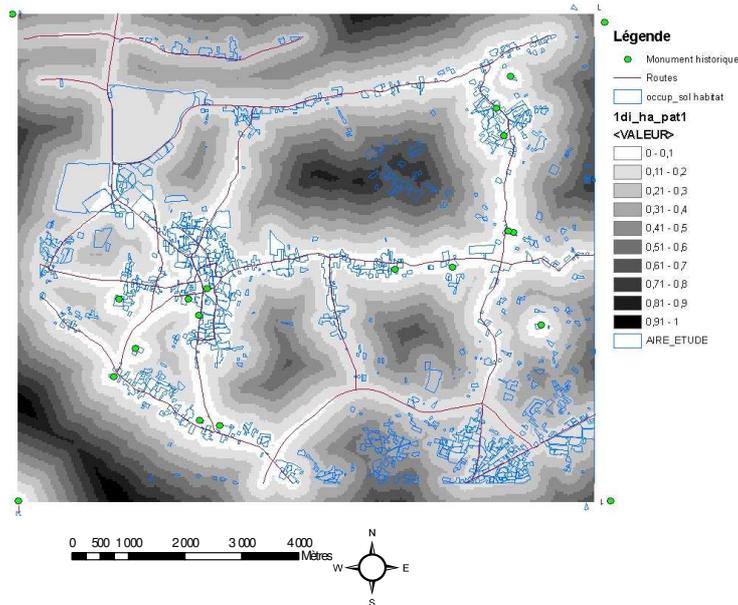


Figure 4. 46 Rayonnement initial

### 3.8.2.2 Insertion de la variante 1

Pour cette variante, le résultat de calcul n'a pas été affiché sur l'écran d'ArcGIS. Le manque du temps ne permet pas d'aboutir ce calcul.

### 3.8.2.3 Insertion de la variante 2

La Figure 4.47 présente le rayonnement généralisé (P) qu'il serait possible d'obtenir grâce à la variante 2 : Les zones claires se situent à proximité des routes. Les zones foncées sont celles pour lesquelles l'accès est le plus difficile.

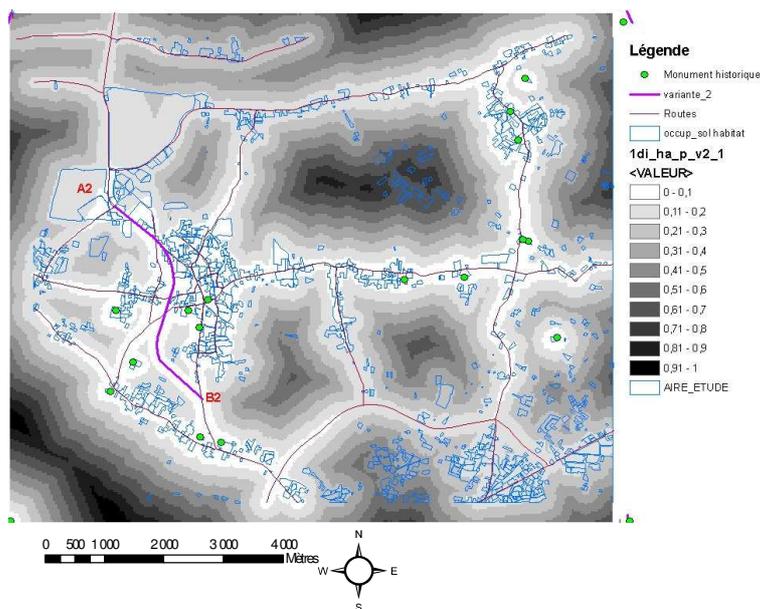


Figure 4.47 Rayonnement avec l'insertion de la variante 2

Le différentiel entre le rayonnement initial et celui de la variante 2, conduit à la carte de l'indicateur  $S_r$  (Figure 4.48). La valeur maximale d'avantage de rayonnement est de 0,2. On observe que le rayonnement augmente pour les zones situées à proximité de la variante (zone sombre dans la Figure 4.48). Toutefois, cette surface de gain n'est pas très étendue et il n'y a pas peu d'habitations dans cette zone.

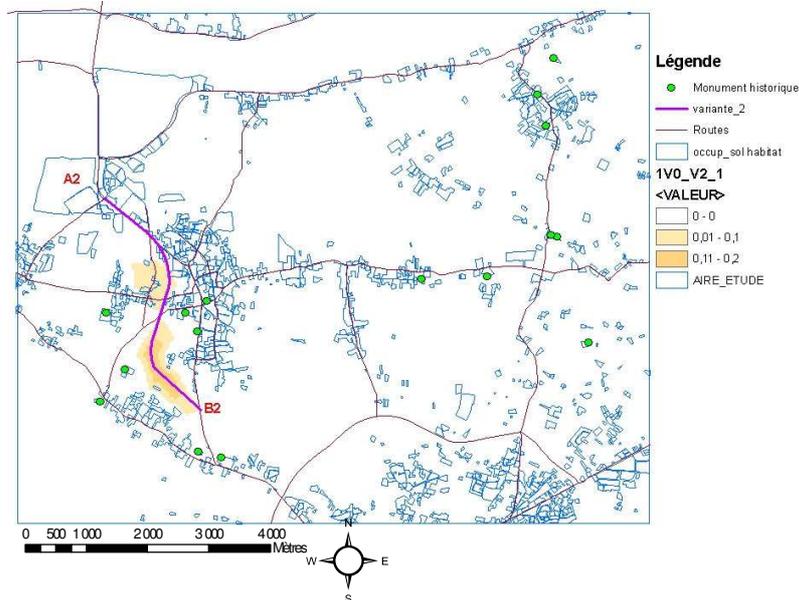


Figure 4.48 Gain de rayonnement de la variante 2

### 3.8.2.4 Insertion de la variante 3

- La Figure 4.49 illustre le rayonnement obtenu avec la variante 3. Passant dans des zones moins habitées, cette variante permet d'étendre les zones claires, donc les zones d'accès facilité.

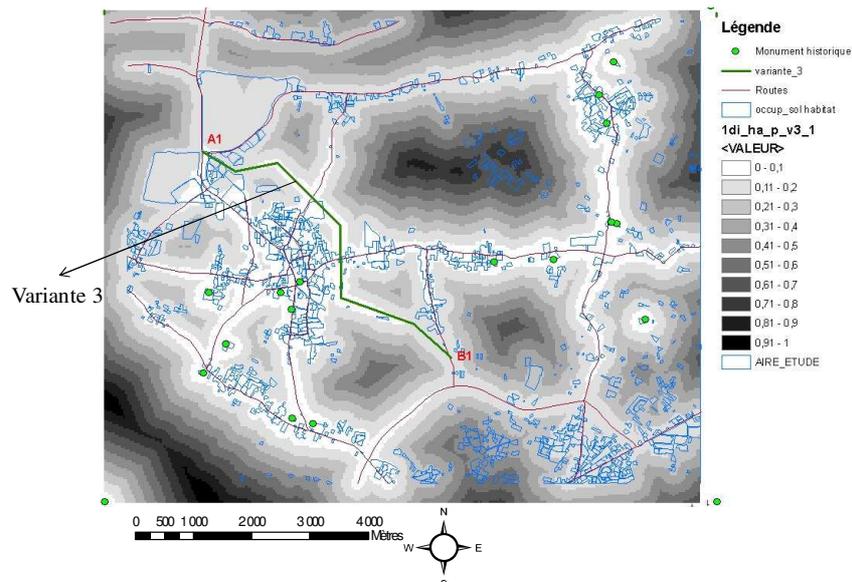


Figure 4.49 Rayonnement avec l'insertion de la variante 3

La Figure 4.50 présente le gain de rayonnement de la variante 3. La valeur maximale obtenue est de 0,5. Toutefois les zones de gain ne touchent pas les sites patrimoniaux.

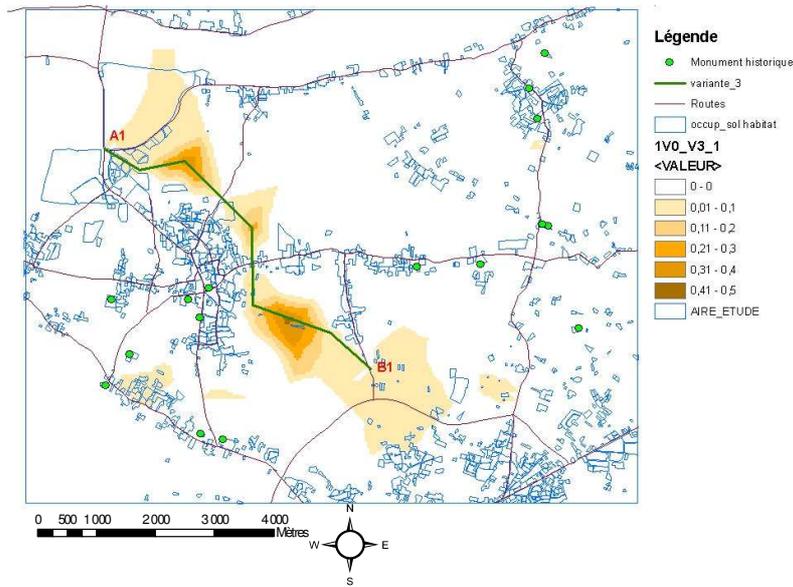


Figure 4.50 Gain de rayonnement de la variante 3

### 3.8.2.5 Insertion de la variante 4

La Figure 4.51 présente le rayonnement de la variante 4. Par rapport à la variante 3, elle permet encore de réduire la surface des zones sombres (les plus difficiles d'accès).

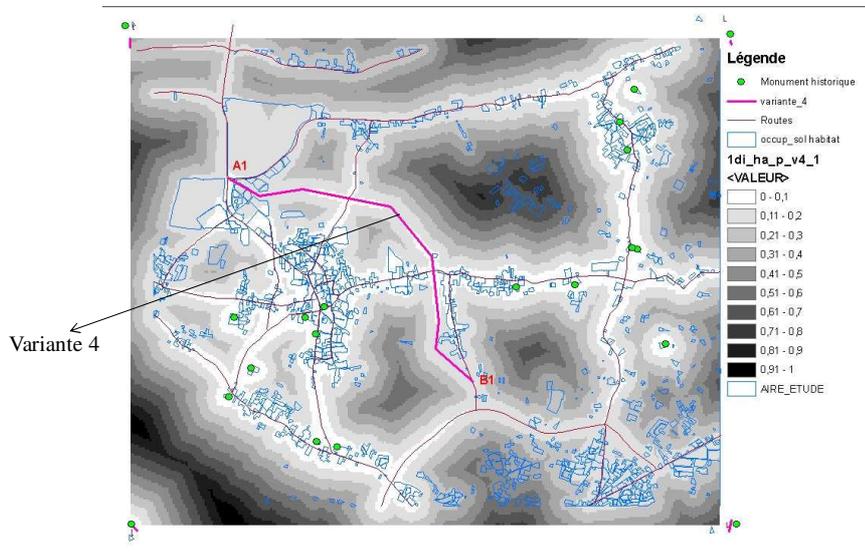


Figure 4.51 Rayonnement de la variante 4

La Figure 4.52 présente le gain de rayonnement de la variante 4. La valeur maximale est aussi de 0,5, mais les zones de gain ne touchent pas non plus les zones patrimoniales.

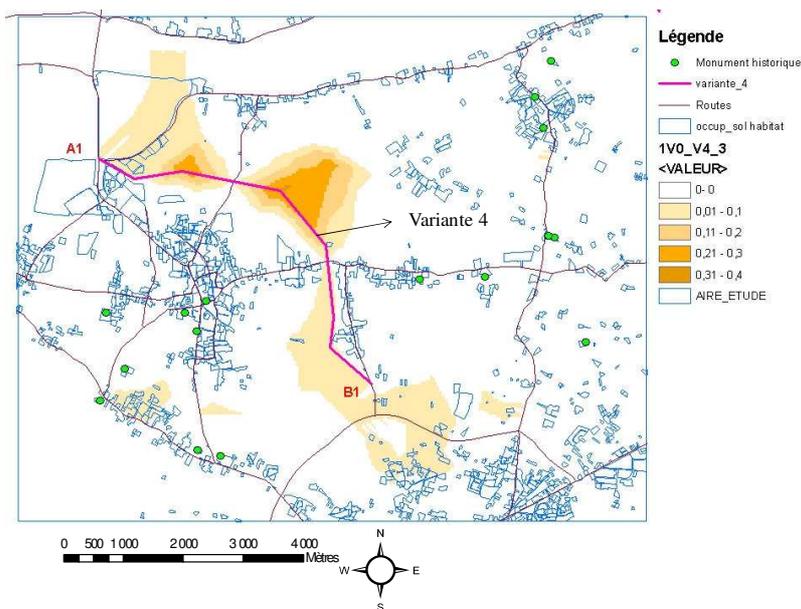


Figure 4.52 Gain de rayonnement de la variante 4

### 3.8.2.6 Insertion de la variante 5

Le rayonnement de la variante 5 est présenté sur la Figure 4.53. Cette variante permet d'étendre encore la surface des zones les plus claires.

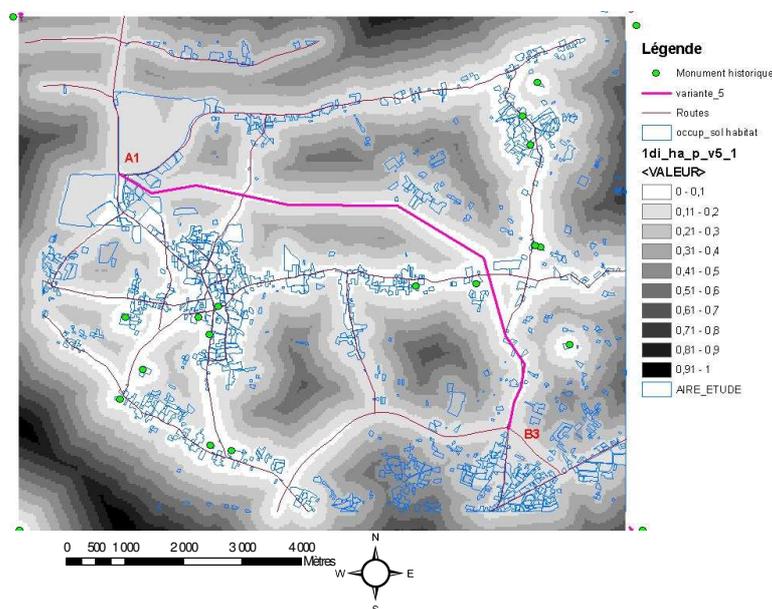


Figure 4.53 Rayonnement de la variante 5

La Figure 4.54 montre le gain de rayonnement permis par la variante 5. La valeur maximale est de 0,7. Les zones de gain atteignent en particulier les zones patrimoniales situées à l'est de la zone d'étude.

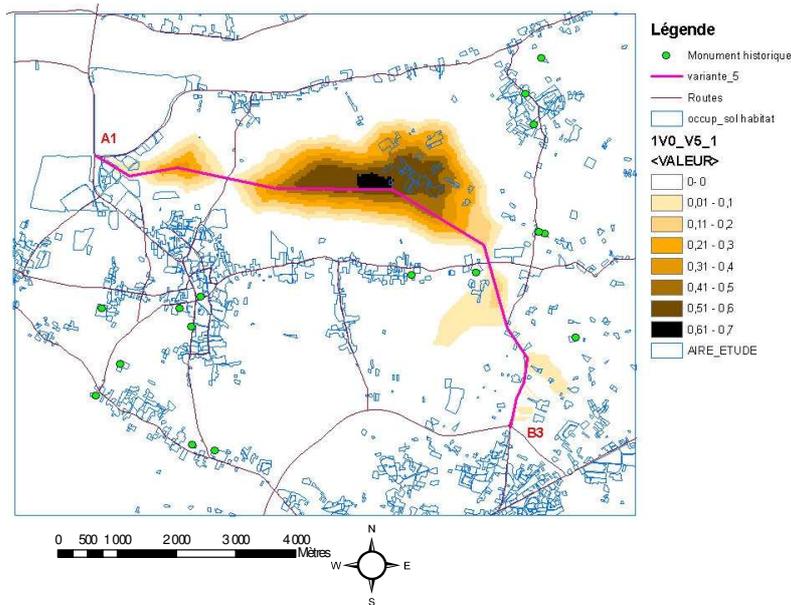


Figure 4.54 Gain de rayonnement de la variante 5

### 3.8.3 Comparaison des variantes selon indicateur $S_r$

Pour comparer les variantes, on calcule la surface totale des zones de gain de chaque variante. Afin d'obtenir l'avantage d'une variante « j », on applique la formule :

$$A_j = \sum S_k \times \Delta P \quad (\text{Eq. 4. 1})$$

Dans laquelle :

- $A_j$  Gain de rayonnement de la variante « j » par rapport au réseau routier existant ( $m^2$ ).
- $S_k$  Nombre d'habitants dans la zone d'avantage « k », dans le cas qu'on n'a pas de données, on prend  $S_k$  comme la surface ou le nombre de maison de la zone « k ».
- $\Delta P$  Valeur de l'avantage du rayonnement local.

En utilisant l'équation (Eq. 4. 1), on peut rechercher la meilleure variante comme suit :

L'avantage du rayonnement à chaque position varie de 0 à 1. Selon notre calcul, ces valeurs varient de 0 à 0,7. Pour chaque bâtiment dans ces zones d'avantage, on attribue les valeurs correspondantes. Pour chaque carte de gain, on compte le nombre de maille ( $S_k$ ) dans chaque intervalle. A chaque maille est attribuée une valeur correspondante ( $I_k$ ). Le résultat des calculs est présenté dans le Tableau 4.27 On constate que la variante 5 est la plus favorable pour le critère rayonnement ( $A_5=1550,8$ ).

Tableau 4.27 Rayonnement des variantes.

	Intervalle							Valeur totale ( $A_j$ )	Classement
	0 - 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,3	0,3 - 0,4	0,4 - 0,5	0,5 - 0,6	0,6 - 0,7		
Valeur attribuée	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7		
Variante 1 ( $S_k$ )	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Variante 2 ( $S_k$ )	323	152	0	0	0	0	0	62,7	4
Variante 3 ( $S_k$ )	2812	646	339	168	11	0	0	584,8	3
Variante 4 ( $S_k$ )	3133	916	500	311	18	0	0	779,9	2
Variante 5 ( $S_k$ )	1243	989	838	594	536	680	91	1550,8	1

## 4 COMPARAISON D'ENSEMBLE DES VARIANTES

### 4.1 Première méthode : classement simple

On compte combien de fois chaque variante a été classée première. La variante classée le plus souvent première sera la meilleure. Si plusieurs variantes apparaissent ex-æquo, on gère la même comparaison les classements comme second. Et aussi de suite jusqu'à

Afin de comparer des variantes de tracé, on fait la somme des ordres de classement de chaque variante sur chaque indicateur. La variante qui aura la plus faible total sera la meilleure. Le Tableau 4.28 récapitule le nombre de fois de classement de chaque variante suivant les différents types d'indicateurs :

Tableau 4.28 Rangs de classement des variantes

Classement (fois)	Rang 1	Rang 2	Rang 3	Rang 4	Rang 5
<b>Variante 1</b>	0	1	2	1	2
<b>Variante 2</b>	1	0	0	5	1
<b>Variante 3</b>	3	1	2	1	0
<b>Variante 4</b>	3	2	1	1	0
<b>Variante 5</b>	3	0	2	0	2

La variante 4 est la meilleure car elle est classée au 1<sup>er</sup> rang et au 2<sup>ème</sup> rang plus souvent que les autres.

Le classement final après la synthèse de tous les indicateurs de calcul est présenté dans le Tableau 4.29.

Tableau 4.29 Range de classement des variantes

Variante	1	2	3	4	5
Classement	4	5	2	1	3

## 4.2 Deuxième méthode : comparaison des variantes en faisant la somme des classements

Dans le cas qu'on veut prendre en compte toutes les classements dans le calcul, on fait la somme de tous les niveaux de chaque variante en attribuant des valeurs pour chaque niveau de classement comme montré dans le Tableau 4.30.

On refait le total uniquement pour elles en ne prenant pas en compte le dernier moyen du classement afin de favorise les variantes les mieux classées. En cas de nouvelle on pourrait ainsi jusqu'à isoler la meilleure variante.

La variante de tracé ayant la valeur « somme de classement » minimale sera la meilleure variante de tracé.

Le Tableau 4.30 répertorie le résultat de calcul pour chaque variante :

Tableau 4.30 Somme de classement des variantes de tracé

Valeur totale	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4	Niveau 5	Totale
Variante 1	0	2	6	4	10	22
Variante 2	1	0	0	20	5	26
Variante 3	3	2	6	4	0	15
Variante 4	3	4	3	4	0	14
Variante 5	3	0	6	0	10	19

On trouve que la valeur totale de la variante 4 est minimale. Elle est donc la meilleure variante.

Le classement final après la synthèse de tous les indicateurs de calcul est présenté dans le Tableau 4.31.

Tableau 4.31 Classement des variantes de tracé selon la 1<sup>ère</sup> méthode

Variante	1	2	3	4	5
Classement	4	5	2	1	3

Les 2 méthodes ci-dessus aboutissent au résultat et un même classement d'ensemble.

## 4.3 Troisième méthode : conversion des indicateurs en valeurs sans unité

### 4.3.1 Principe de la méthode

Les unités des indicateurs n'étant pas les mêmes, on ne peut donc pas les additionner d'une façon mathématique. On propose donc ici une méthode adimensionnelle permettant de les combiner.

La valeur de chaque indicateur est adimensionnée en formulant le rapport entre l'écart avec la solution la plus défavorable et l'écart total entre les variantes. . On additionne ensuite ces valeurs (avec ou sans pondération) pour obtenir l'évaluation totale d'une variante. Cette méthode peut s'appliquer lorsque les indicateurs sont indépendants.

Deux cas se présentent. Soit la valeur maximale de l'indicateur correspond au cas le plus défavorable, soit l'inverse.

A partir des données :

- n variantes  $V_1, V_2, \dots, V_n$
- k indicateurs  $I_1, I_2, \dots, I_k$

Ainsi par exemple pour l'indicateur « j », les valeurs de l'indicateur S pour les n variantes sont :  $S_{j1}, S_{j2}, S_{j3}, \dots, S_{jn}$ . Parmi ces valeurs, on détermine la valeur maximale  $S_{j\max}$  et la valeur minimale  $S_{j\min}$  pour toutes les variantes.

**Type 1 : Plus la valeur d'indicateur est grande, plus le projet est défavorable**

Les valeurs de l'indicateur « j » pour chaque variante sont adimensionnées suivant la formule :

$$E_{jm} = \frac{S_{j\max} - S_{jm}}{S_{j\max} - S_{j\min}} (m = 1, 2, \dots, N) \quad (\text{Eq. 4. 2})$$

- $E_{jm}$  prendra la valeur dans l'intervalle [0 ; 1] ;
- $E_{jm}$  correspond à la valeur d'impact « j » pour la variante « m ».

**Type 2 : Plus la valeur d'indicateur est grande, plus le projet est favorable**

Les valeurs de l'indicateur « j » pour chaque variante sont adimensionnées selon la formule :

$$E_{jm} = \frac{S_{jm} - S_{j\min}}{S_{j\max} - S_{j\min}} (m = 1, 2, \dots, N) \quad (\text{Eq. 4. 3})$$

- $E_{jm}$  prendra la valeur dans l'intervalle [0 ; 1] ;
- $E_{jm}$  correspond à la valeur d'impact « j » pour la variante « m ».

L'évaluation d'un projet routier se base sur les valeurs d'indicateurs mais la combinaison de tous les indicateurs doit prendre en compte des valeurs de pondération éventuelles. Pour K indicateurs, les valeurs de pondération correspondantes sont :  $p_1, p_2, p_3, \dots, p_k$ .

L'impact total pour la variante « m » est évalué suivant la formule :

$$A_m = \sum_{j=1}^K p_j \times E_{jm} \quad (\text{Eq. 4. 4})$$

La dernière étape est la comparaison des valeurs d'impact des variantes. La meilleure variante aura la valeur  $A_m$  maximale.

## 4.3.2 Application de la méthode

### 4.3.2.1 Résultats des indicateurs adimensionnés

Le Tableau 4.32 présente les valeurs initiales avec toutes les dimensions d'indicateurs de chaque variante. Dans ce tableau, pour les indicateurs Ieg, If, Nc, Lc, Nf, Ip, et Se, une valeur élevée correspond à un effet important : c'est la valeur maximale qui sera retenue pour appliquer la formule (Eq. 4.2). Pour l'indicateur Sr, à une valeur faible correspond un effet important : c'est la valeur minimale qui sera retenue pour appliquer la formule (Eq. 4.3).

Tableau 4.32 Valeurs initiales des indicateurs du projet N°1

Indicateurs	Variantes du projet N°1				
	1	2	3	4	5
Impacts globaux environnementaux (Ieg)	2583615	2197849	3428859	3537003	5167231
Fragmentation des écosystèmes (If)	136,56	103,23	8,68	8,68	82,95
Effets sur la sécurité et circulation (Nc)	3	4	1	1	5
Effets sur le patrimoine bâti et sur le milieu naturel (Lc)	1480	990	0	0	954
Nuisance sonore (Nf)	1	1	1	1	1
Facilité de déplacement (Ip)	10,6	10,6	9,3	9,7	10
Prélèvement d'emprise (Se)	0,27	0,37	0,38	0,31	0,32
Rayonnement (Sr)	62,7	62,7	584,8	779,9	1550,8

Pour l'indicateur « nuisance sonore », On suppose donc ici que la nuisance sonore est égale pour toutes les variantes. Ensuite, en appliquant la méthode de conversion, on obtient le tableau des indicateurs équivalents suivant (Tableau 4.33).

Tableau 4.33 Valeurs de conversion des indicateurs

Indicateurs équivalents	Variantes du projet N°1				
	1	2	3	4	5
Impacts globaux environnementaux (Ieg)	0,87	1,00	0,59	0,55	0,00
Fragmentation des écosystèmes (If)	0,00	0,26	1,00	1,00	0,42
Effes sur la sécurité et circulation (Nc)	0,50	0,25	1,00	1,00	0,00
Effets sur le patrimoine bâti et sur le milieu naturel (Lc)	0,00	0,33	1,00	1,00	0,36
Nuisance sonore (Nf)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Facilité de déplacement (Ip)	0,00	0,00	1,00	0,69	0,46
Prélèvement d'emprise (Se)	1,00	0,09	0,00	0,64	0,55
Rayonnement (Sr)	0,00	0,00	0,35	0,48	1,00

### 4.3.2.2 Pondération des indicateurs et classement des variantes

Les indicateurs seront pondérés selon des coefficients différents. Dans ce cas ces valeurs sont égales (= 1), on a l'impact total de chaque variante comme illustré dans le Tableau 4.34 :

Tableau 4.34 Pondération des indicateurs (P=1)

Indicateurs équivalents	Variantes du projet N°1					Pondération
	1	2	3	4	5	
Impacts globaux environnementaux (Ieg)	0,87	1,00	0,59	0,55	0,00	1
Fragmentation des écosystèmes (If)	0,00	0,26	1,00	1,00	0,42	1
Effets sur la sécurité et circulation (Nc)	0,50	0,25	1,00	1,00	0,00	1
Effets sur le patrimoine bâti et sur le milieu naturel (Lc)	0,00	0,33	1,00	1,00	0,36	1
Nuisance sonore (Nf)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1
Facilité de déplacement (Ip)	0,00	0,00	1,00	0,69	0,46	1
Prélèvement d'emprise (Se)	1,00	0,09	0,00	0,64	0,55	1
Rayonnement (Sr)	0,00	0,00	0,35	0,48	1,00	1
<b>Total</b>	<b>2,37</b>	<b>1,93</b>	<b>4,94</b>	<b>5,36</b>	<b>2,78</b>	
<b>Classement des variantes</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	

Dans ce cas, on trouve que la variante 4 est la meilleure. Le classement des variantes est la même par rapport aux méthodes 1 et 2.

#### 4.3.2.3 Sensibilité des variantes aux combinaisons et pondération des indicateurs, classement des variantes.

Dans le cadre de la concertation et notamment des débats publics, les valeurs des coefficients de pondération sont un critère de négociation entre acteurs permettant d'exprimer les enjeux plus ou moins forts relatif à divers dimensions du projet, et permettant aussi de tester la « robustesse » des classements de variante (sensibilité des classements aux valeurs relatives des coefficients).

Il est donc important de pouvoir attribuer différents valeurs de pondération aux indicateurs pour vérifier la sensibilité des variantes à la prise en compte entre 0 et 1 des différents indicateurs.

On peut attribuer de différents valeurs de pondération aux indicateurs pour vérifier la sensibilité des variantes aux ces valeurs.

Cette fonctionnalité a été développée sur Excel. On présente ci-dessus 2 exemples de pondérations contrastés.

Pour le 1<sup>er</sup> cas : on suppose que les 4 premiers indicateurs soient plus importants par rapport aux 4 derniers indicateurs, on attribue des valeurs P=1. Le Tableau 4.35 présente le résultat :

Tableau 4.35 Pondération des indicateurs (1<sup>er</sup> cas)

Indicateurs équivalents	Variantes du projet N°1					Pondération
	1	2	3	4	5	
Impacts globaux environnementaux	0,87	1,00	0,59	0,55	0,00	1
Fragmentation des écosystèmes	0,00	0,26	1,00	1,00	0,42	1
Effes sur la sécurité et circulation (Nb carrefours)	0,50	0,25	1,00	1,00	0,00	1
Effets sur le patrimoine bâti et sur le milieu naturel	0,00	0,33	1,00	1,00	0,36	1
Nuisance sonore	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,5
Facilité de déplacement	0,00	0,00	1,00	0,69	0,46	0,5
Prélèvement d'emprise	1,00	0,09	0,00	0,64	0,55	0,5
Rayonnement	0,00	0,00	0,35	0,48	1,00	0,5
Total	1,87	1,89	4,26	4,45	1,78	
<b>Classement des variantes</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>5</b>	

On trouve que le classement ne change pas, la variante 4 est encore la meilleure.

Pour le 2<sup>ème</sup> cas : on suppose que les 4 derniers indicateurs soient plus importants par rapport aux 4 premiers indicateurs, on attribue des valeurs P=1. Le Tableau 4.36 présente le résultat :

Tableau 4.36 Pondération des indicateurs (2<sup>ème</sup> cas)

Indicateurs équivalents	Variantes du projet N°1					Pondération
	1	2	3	4	5	
Impacts globaux environnementaux	0,87	1,00	0,59	0,55	0,00	0,5
Fragmentation des écosystèmes	0,00	0,26	1,00	1,00	0,42	0,5
Effes sur la sécurité et circulation (Nb carrefours)	0,50	0,25	1,00	1,00	0,00	0,5
Effets sur le patrimoine bâti et sur le milieu naturel	0,00	0,33	1,00	1,00	0,36	0,5
Nuisance sonore	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1
Facilité de déplacement	0,00	0,00	1,00	0,69	0,46	1
Prélèvement d'emprise	1,00	0,09	0,00	0,64	0,55	1
Rayonnement	0,00	0,00	0,35	0,48	1,00	1
Total	1,69	1,01	3,14	3,59	2,39	
<b>Classement des variantes</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	

On trouve que le classement ne change pas, la variante 4 reste la meilleure.

## 5 CONCLUSION

Ce chapitre a présenté la capacité d'appliquer des méthodes de calcul développées dans le chapitre 3 à un projet routier.

Chaque type d'indicateur a été calculé quantitativement et le résultat de calcul a été représenté graphiquement à l'aide de l'observation.

Tous les résultats obtenus sont convenables : par exemple, la route plus proche de la zone d'habitation favorise le transport mais elle provoque aussi des nuisances sonores.

Il reste encore quelques erreurs dans le calcul, par exemple pour l'indicateur « rayonnement » pour la variante 1, le résultat obtenu n'est pas logique.

Les indicateurs ont été calculés rapidement grâce au logiciel ArcGIS. Pour chaque indicateur, on a obtenu de différentes valeurs pour des variantes de tracé. Delà, on peut classer ces variantes de tracé.

La pondération des indicateurs a été testée afin d'intégrer des avis des acteurs dans l'évaluation d'un projet routier.



## **CONCLUSION GENERALE**

Parmi les points positifs du bilan sur ce travail, la méthode proposée a montré qu'elle permettait de produire des cartes de sensibilité des aires d'étude de façon analogue à celles réalisées manuellement aujourd'hui par le bureau d'étude. Cette capacité est en particulier intéressante pour traiter de grandes aires d'étude. On peut concevoir que dans un stade de développement ultérieur de l'outil, la méthode puisse être utilisée pour travailler à différentes échelles. Ceci permettrait, au cas par cas, en fonction des besoins, de descendre progressivement vers des niveaux d'étude de plus en plus détaillés.

Parmi les 9 indicateurs présentés, certains sont issus de propositions faites par différents auteurs dans la littérature scientifique. Notre travail a consisté vis-à-vis d'eux à rechercher des moyens de les représenter de façon cartographique. D'autres, nouveaux, proviennent d'une réflexion conduite avec le bureau d'étude à partir de ces besoins. L'expertise du bureau d'étude a permis d'identifier les indicateurs les plus pertinents à développer et à représenter sous forme cartographique. Toutes les pistes envisagées n'ont pas pu être transformées en indicateurs quantitatifs cartographiables dans le cadre de ce travail et laissent ouvertes des possibilités de développement ultérieures (indicateur de covisibilité).

Ces indicateurs s'inscrivent dans le champ du développement durable avec une prédominance des indicateurs environnementaux (environnement global et local) et dans une moindre mesure des indicateurs relatifs à des questions d'ordre social (sécurité de circulation, rayonnement). La dimension économique n'a pas été traitée dans le cadre de ce travail mais pourrait très facilement y être intégrée (coûts de construction, entretien, exploitation des infrastructures notamment).

Les temps de calcul nécessaires à l'obtention des valeurs d'indicateurs et de représentations cartographiques, sont apparus tout à fait raisonnables et compatibles avec certains aspects pratiques très importants pour les chances de développement opérationnel d'un outil informatique. En effet, cet outil pourrait/devrait bénéficier d'une capacité de calcul rapide afin de lui conférer le caractère interactif nécessaire à son utilisation dans le cadre des procédures de concertation/arbitrage de points de vue et prise de décision. Ainsi, les effets sur le résultat final du changement de certaines données d'entrée pourraient être évalués et représentés rapidement pour éclairer le processus de décision.

Le développement de l'outil peut aussi être envisagé en tant que nouveau support de travail pour le bureau d'étude et laboratoires, dans le domaine de la caractérisation des territoires, des infrastructures, et de leurs interactions. De ce point de vue, les capacités de rapidité d'obtention des résultats de calcul sont moins importantes que celles de modularité de combinaison des indicateurs et de création de nouveaux indicateurs.

A ce titre, les résultats fournis par la méthode développée ont permis de constater qu'ils suivaient assez fidèlement les résultats de l'expertise multiple des spécialistes du bureau d'étude puisqu'elle parvenait aux mêmes conclusions (identification des variantes de tracé, identification des meilleures variantes sur la base de critères environnementaux et sociaux essentiellement). Cette fidélité et cette fiabilité de la méthode permettent d'envisager le

développement de l'outil comme un moyen d'appui et de mise en commun des informations pour spécialistes des différents domaines (les thématiques) concernés, leur permettant de dégager du temps pour approfondir, si nécessaire, les expertises sur les points plus sensibles et/ou importants des projets dans le domaine de la caractérisation des territoires et de l'adaptation des infrastructures routières.

Les fonctionnalités du support informatique choisi pour conduire ce travail (ArcGIS) ont confirmé les enseignements de l'analyse bibliographique conduite préalablement, concernant tant les capacités de traitement des données que les capacités de représentation cartographique des indicateurs territoriaux.

Afin de progresser dans la formalisation de critères de discrimination globaux entre variantes d'un même projet sur la base de l'ensemble des indicateurs proposés (ou choisis par les acteurs des projets), des méthodes relativement simples de classement des variantes ont été proposées. Outre le chiffrage de la valeur de chaque variante, elles permettent d'exprimer aussi des écarts chiffrables entre ces variantes de façon à relativiser les différences entre elles. Ces méthodes permettent aux acteurs des projets de choisir et combiner les indicateurs pris en compte dans l'évaluation, en fonction des spécificités des territoires concernés et des priorités qu'ils souhaitent impulser en matière d'aménagement.

A ce stade de développement de la méthode, de la même façon que cela est pratiqué par le bureau d'étude avec les acteurs (dans le cadre des réunions publiques notamment), cette étape ultime du processus de décision que constitue le choix de la variante, est basé sur l'utilisation d'un tableau de synthèse des indicateurs. Ce tableau permet de combiner les indicateurs avec des opérateurs mathématiques simples (pondérations) parlant pour tous les acteurs. Ceci est un progrès en matière de formalisation des critères de choix des acteurs, mais il n'en demeure pas moins que la traduction sous forme graphique des effets combinés des indicateurs pris en compte constituerait une avancée supplémentaire intéressante (de façon à obtenir des rendus analogues à ceux réalisés à travers les cartes de sensibilité des aires d'étude). Ce point constitue une piste de développement de la méthode.

Parmi les points restant à améliorer figure la prise en compte explicite des normes techniques (négligées à ce stade de développement de la méthode). Elles ont été intégrées partiellement et indirectement parfois en imposant des points de passage dans la recherche automatique des tracés. Des contraintes techniques comme la prise en compte des rayons de courbure limites, voire des pentes limites, pourraient être intégrées dans la recherche des tracés. Il ne s'agit pas pour autant de développer des fonctionnalités aussi poussées que celles des logiciels spécialisés (tels que ceux utilisés par les projeteurs routiers par exemple), mais plutôt d'envisager une amélioration du dialogue entre les logiciels spécialisés et l'outil d'aide à l'insertion. Ce dernier pourrait intégrer les résultats des logiciels spécialisés, valider leur compatibilité et retourner vers les divers spécialistes les éventuels problèmes d'incompatibilité à résoudre.

On voit donc que l'outil envisagé pourrait avoir deux facettes. L'une orientée vers le travail au sein du bureau d'étude (ou du laboratoire pour les questions relevant de la

recherche) pour la caractérisation des territoires, des infrastructures et de leurs interactions. L'autre orientée vers le travail de concertation, arbitrage entre acteurs et priorités, et la décision.

Il aurait été souhaitable que les propositions faites dans le cadre de ce travail soient testées sur un ou plusieurs projets n'ayant pas servis au développement de la méthode et des indicateurs. Ceci constitue une étape essentielle dans la perspective du développement de l'outil et nécessite des projets pour lesquels des jeux complets de données sur toutes les dimensions prises en compte par les indicateurs soient disponibles. Ces jeux de données devraient comprendre des informations relatives aux effets des mesures compensatoires de façon à évaluer aussi leurs effets, ce genre de tests n'ayant pas pu être réalisé dans le cadre de cette étude.

Dans certaines gammes d'utilisation (indicateur de rayonnement), le support logiciel a montré des limites en termes de capacité de calcul. Ceci était imputable à la prise en compte dans le calcul d'un grand nombre de points du territoire (calcul pour chaque maille vers toutes les autres mailles). Ce genre de limite doit être pris en compte dans la perspective du développement de l'outil en optimisant les algorithmes des fonctions créées, mais en gardant aussi à l'esprit la vocation première de l'outil qui est l'évaluation de l'insertion de l'infrastructure. L'indicateur « rayonnement généralisé » s'approche d'un concept d'aménagement général du territoire. A des finalités de planification de l'aménagement du territoire, d'autres outils que celui développé pourraient peut-être être plus adaptés.

## REFERENCES

- Affuma J.K., Brown A.L., Chanb Y.C., 2003. *Integrating air pollution modelling with scenario testing in roadtransport planning: the TRAEMS approach*. The Science of the Total Environment 312, pp. 1–14.
- AIPCR (Association Mondiale de la Route), 1999. *Processus de décision pour un transport durable*. Rapport introductif, Association Mondiale de la Route1, Kuala Lumpur.
- Akay A.E., Erdas O., Reis M., Yuksel A., 2008. *Estimating sediment yield from a forest road network by using a sediment prediction model and GIS techniques*. Building and Environment 43, pp. 687–695.
- Altenstedt J., Pleijel K., 2000. *An alternative approach to Photochemical Ozone Creation Potentials Applied under European Conditions*. Journal of Air and Waste Management Association, Vol.50, pp. 1023-1036.
- ASCOTP (Association pour la Connaissance des Travaux Publique), *Connaissance sur la construction d'une route*. Disponible sur [http://colleges.planete-tp.com/IMG/pdf/pdmf\\_s3\\_doseleve\\_cle1769eb-1.pdf](http://colleges.planete-tp.com/IMG/pdf/pdmf_s3_doseleve_cle1769eb-1.pdf), consulté : 5/2011.
- Bertolini L., le Clercq F., Kapoen L., 2005. *Sustainable accessibility*. Transport policy 12, pp. 207-220
- Bhaskar A., Chung E., Kuwahara M., 2007. *Development and implementation of the area wide Dynamic Road traffic Noise (DRONE) simulator*. Transportation Research Part D 12, pp. 371-378.
- Brundtland G.H., 1987. *Notre avenir à tous*. 349 p.
- CERTU (Centre d'Etude sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et la construction publique), 2006 a. *Prendre en compte le développement durable dans un projet – Guide d'utilisation de la grille RST<sub>02</sub>*. 66 p.
- CERTU (Centre d'Etude sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et la construction publique), 2006 b. *Prendre en compte le développement durable dans un projet – Glossaire du développement durable*. 37 p.
- CGN (Conseil Général département du Nord), CSTB, LCPC, CETE, 2006. *Démarche Route Durable*.
- Chang N.B., Parvathinathan G., Breeden J.B, 2008. *Combining GIS with fuzzy multicriteria decision-making for landfill siting in a fast-growing urban region*. Journal of Environmental Management 87, pp. 396–406.
- Conseil économique et social ,2003. *Environnement et développement durable l'indispensable mobilisation des acteurs économiques et sociaux*. Journal officiel de la république française, 92 p. LCPC
- Dai. F.C., Lee C.F., Zhang X.H., 2001. *GIS-based geo-environmental evaluation for urban land-use planning: a case study*. Engineering geology 61, pp. 257-271
- DETECT, 2000. *Stratégie du DETECT*. Berner
- Devaux S., Rachline M., 2004. *Le terrassement, métier fondamental*. Viloeco, 95 p.
- Do B.C., Duong H.H., Nguyen X.T., Nguyen Q.C., 1998. *Conception des routes*.
- EPA, 2000. *Frame work for responsible environmental decision-making : using life cycle assessment to evaluate preferability of products*. EPA report n° 600/R-00/095.

- Facaç F., Sivertun A., 2010. *Road traffic noise : GIS tools for noise mapping and a case study for Skâne region*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol.34, Part XXX.
- François D., Martaud T., Roppert C., Rayssac E., Jullien A., Proust C., 2010. *Natural and Alternative Materials for Road Construction – Environmental Optimization of Ressources Management in a Territory*. Proceedings of the second international conference on transport infrastructures (2<sup>nd</sup> ICTI), Sao Paulo, 4-6 August, 2010. Edited by R.M. Fortes & P. Pereira. ISBN 978-972-8692-57-5.
- Frank A.U, Wallace M., 1994. *Constraint based modeling in a GIS : Road design as a case study*, 10 p.
- Gauvreau B., 2007. *Rapport indicateurs*, 11 p.
- Geneletti D., 2002. *Ecological evaluation for environmental impact assessment*. 312 p.
- Geneletti D., 2004. *Using spatial indicators and value functions to assess ecosystem fragmentation caused by linear infrastructures*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 5, pp. 1-15.
- Geurs K. et van Wee D., 2004. *Accessibility evaluation of land-use and transport strategies*. Journal of Transport Geography 12, pp. 127-140
- Goedkoop M., 1996. *The Eco-indicator 95 : Methodology report*. Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, 250-251, ref. 4527, pp. 93-113
- Gutiérrez J., Condeço-Melhorado A., Martin J.C., 2010. *Using accessibility indicators and GIS to assess spatial spillovers of transport*. Journal of Transport Geography 18, pp. 141-152
- Gutiérrez J., Condeço-Melhorado, Martin J.C, 2009. *Using accessibility indicators and GIS to assess spatial spillovers of transport infrastructure investment*, Journal of transport geography.
- Hamed M., Effat W., 2007. *A GIS-based approach for the screening assessment of noise and vibration impacts from trasit projects*. Journal of Environmental Management 84, pp. 305-313
- Hoang T., 2005. *Tronçons autoroutiers : une méthodologie de modélisation environnementale et économique pour différents scénarios de construction et d'entretien*. Thèse du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, école doctorale MTGC – Ecole Centrale Nantes, 206 p.
- Hossaina M. S., Chowdhurya S.R., Dasa N.G., Sharifuzzamanb S.M., Sultana A., 2009. *Integration of GIS and multicriteria decision analysisfor urban aquaculture development in Bangladesh*. Landscape and Urban Planning 90, pp. 119–133.
- Huijbregts M.A.J., Thissen U., Jager T., 2000. *Priority assessment of toxic substances in life cycle assessment. Part I: Calculation of toxicity potentials for 181 substances with the nested multimedia fate exposure and effects model USES-LCA*. Chemosphere Vol.41, pp 541-573.
- Jha M.K., Kang M.W., 2009. *GIS-based model for highway noise analysis*. Journal of infrastructure systems ASCE, pp. 88-94.
- Kalamaras G.S., Brino L., Carrieri G., Pline C., Grasso P., 2000. *Application of multicriteria analysis to select the best highway alignment*. Tunnelling and Underground Space Technolog, Vol. 15, No. 4, pp. 415-420.
- Keshkamat S.S., Looijen J.M., Zuidgeest, 2009. *The formulation and evaluation of transport route planning alternatives : a spatial decision support system for the Via Baltica project*, Poland, pp. 54-64.
- Khalifa K., 2000. *Méthode d'évaluation des impacts*. Techniques de l'ingénieur, traité environnement

- Lee S.W., Chang S.I., Park Y.M., 2008. *Utilizing noise mapping for environmental impact assessment in a downtown redevelopment area of Seoul, Korea*. Applied Acoustics 69, pp. 704-714.
- Li X., Wang W., Li F., Deng X., 1999. *GIS based map overlay method for comprehensive assessment of road environmental impact*. Transportation Research Part D4, pp. 147-158.
- Liu S., 2002. *An integrated GIS approach to accessibility analysis in urban transportation planning: a paramètree study of Singapore*. PhD National Institute of Education Nanyang Technological University, Singapore.
- MEDDTL (Ministère des Ecologies, du Développement Durable, des Transports et du Logement), site : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Les-principales-etapes-de-l-3228.html>, consulté : 10/2010
- MEDDTL (Ministère des Ecologies, du Développement Durable, des Transports et du Logement), site : [http://www.developpement-durable.gouv.fr/spip.php?page=article&id\\_article=3229](http://www.developpement-durable.gouv.fr/spip.php?page=article&id_article=3229), consulté : 4/2011
- METL (Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement, Direction des Routes), 1998. *Les études d'environnement dans les projets routiers urbains*, 191 p.
- METT (Ministère de l'équipement, des Transports et du Tourisme), 1994. *Conception et dimensionnement des structures de chaussée*. 191 p.
- Miller H.J. et Wu Y., 2000, GIS Software for Measuring Space-Time Accessibility in transportation planning and analysis, GeoInformatica, pp. 141-159.
- Molines N., 2003. *Méthodes et outils pour la planification des grandes infrastructures linéaires et leur évaluation environnementale*. Thèse de l'université Jean Monnet de Saint-Etienne, 343 p.
- OFROU (Office Fédérale des Route), 2002. *NISTRA : Indicateurs du développement durable pour les projets d'infrastructure routière*. 145p.
- Ortega E., Mancebo S., Lopez E., 2004. *Using GIS modelling to assess accessibility improvements and its potential indirect effects on the environment due to transport infrastructure plans development*. 9p.
- Pamanikabud P., Tansatcha M., 2003. *Geographical information system for traffic noise analysis and forecasting with the appearance of barriers*. Environmental Modelling and Software, pp. 959-973.
- Phua M. H., Minowa M., 2005. *A GIS-based multi-criteria decision making approach to forest conservation planning at a landscape scale: a case study in the Kinabalu Area, Sabah, Malaysia*. Landscape and Urban Planning 71, pp. 207-222.
- Piantanakulchai M., Saengkhaio N., 2003. *Evaluation of alternatives in transportation planning using multi-stakeholders multi-objectives AHP modeling*. Proceedings of the Eastern Asia Society for transportation studies, vol.4, pp.1613-1628
- Pior M.Y., Shimizu E., 2001. *Gis-aided evaluation system for infrastructure improvements: focusing on simple hedonic and Rosen's two-step approaches*. Computer Environment and Urban Systems 25, pp. 225-246.
- Potel C., Bruneau M., 2006. *Acoustique générale : équations différentielles et intégrales, solutions en milieux fluides et solides, application, Les filières technologiques des enseignements supérieurs*. 343 p.
- Quintana S.M., Ramos B.M., Martinez M.A.C., 2010. *A model for assessing habitat fragmentation caused by new infrastructures in extensive territories – Evaluation of the impact of the Spanish strategic infrastructure and transport plan*. Journal of environmental Management, pp. 1087-1096.

- Ramade F., 2000. *Dictionnaire encyclopédique des Pollutions*. 690 p.
- Rebolj D., Sturm P.J., 1999. *A GIS based component-oriented integrated system for estimation, visualization and analysis of road traffic air pollution*. *Environmental Modelling & Software* 14, pp. 531–539.
- RGRA, 2001, *Millennium book*. 170 p.
- Saaty T.L., 1999. *Fundamental of the analytic network process*. ISAHP, 14 p.
- Sayagh S., 2007. *Approche multicritère de l'utilisation de matériaux alternatifs dans les chaussées*. Thèse du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, école doctorale MTGC – Ecole Centrale Nantes, 218 p.
- Schriver-Mazzuoli L., 2007. *Nuisances sonores – prévention – protection- réglementation*. Ademe, l'Usinenouvelle, Dunod, 190 p.
- SETRA (Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes), 1985, *Instruction sur les conditions techniques d'aménagements des autoroutes de liaison*. Document SETRA, 53 p.
- SETRA (Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes), 1994. *Aménagement des routes principales (sauf les autoroutes et routes express à deux chaussés)*. Guide technique SETRA, 117 p.
- SETRA (Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes), 1999 a. *Systèmes d'Information géographique et conception routière et autoroutière, Fascicule 2 : Utilisation d'un SIG dans les études de liaisons nouvelles à inscrire au schéma directeur*. Rapport, 71 p.
- SETRA (Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes), 1999 b. *Systèmes d'Information géographique et conception routière et autoroutière, Fascicule 3 : Utilisation d'un SIG dans les études préliminaires d'avant-projet sommaire*. Rapport, 62 p.
- SETRA (Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes), 1999 c. *Systèmes d'Information géographique et conception routière et autoroutière, Fascicule 4 : Utilisation d'un SIG dans les études d'avant-projet sommaire*. Rapport, 86 p.
- SETRA (Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes), 2009 a. *Prévision du bruit routier, Fascicule 1 : Calcul des émissions sonores dues au trafic routier*. Rapport, 124 p.
- SETRA (Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes), 2009 b. *Prévision du bruit routier, Fascicule 2 : Méthode de calcul de propagation du bruit incluant les effets météorologiques (NMPB 2008)*. Rapport, 133 p.
- SETRA (Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes), 2010. *Les outils d'évaluation des projets routiers d'Ariane à TransCAD*. Rapport, 126 p.
- SETRA, CERTU, ADEME, 2001. *Les études d'environnement dans les projets routiers « volet air »*. Annexe technique à la note méthodologique sur les études d'environnement dans les projets routiers « volet air ». 219 p.
- Snyder S.A., Whitmore J.H., Schneider I.E., 2008. *Ecological criteria, participant preferences and location models: A GIS approach toward ATV trail planning*. *Applied Geography* 28, pp. 248-258.
- Svoray T., Bar P., Bannet T., 2005. *Urban land-use allocation in a Mediterranean ecotone: Habitat Heterogeneity Model incorporated in a GIS using a multi-criteria mechanism*. *Landscape and Urban Planning* 72, pp. 337–351.
- Taouss A, 2009. *Système d'information géographique – Notions Fondamentales*. 59p.
- Tille M., 2000. *Choix de variantes d'infrastructures routières : méthodes multicritères*. Thèse de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 388 p.
- UNICEM Bretagne, 2008. <http://www.unicem-bretagne.fr/fr/content.php?pri=31sub=21ssub=2>

- Ventura A., Chabane M., Monéron P., Gudoux Y. Schemid M., 2004. *Comparaison environnementale de couches de liaison de chaussée recyclées à différents taux par la méthode d'analyse de cycle de vie*. Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, 250-251, ref. 4527, pp. 93-113.
- Ventura A., Jullien A., Tamagny P., Dauvergne M., 2009. *ECORCE 1.0 ECO-comparateur Routes Construction Entretien. Méthode des Modules Routiers*. Manuel de référence, 42 p.
- Yang F., Zeng G., Du C., Tang L., Zhou J., Li Z., 2008. *Spatial analyzing system for urban land-use management based on GIS and multi-criteria assessment modeling*. Progress in Natural Science 18, pp. 1279–1284.
- Zhu X., Liu S., 2004. *Analysis of the impact of the MRT system on accessibility in Singapore using an integrated GIS tool*. Journal of Transport Geography 12, pp. 89-101.



**ANNEXE**

## **ANNEXE 1 :**

### **TYPOLOGIE ET CARACTERISTIQUES DES ROUTES**

Trois principaux types de routes interurbaines doivent être distingués (SETRA, 1985, 1994) :

- les routes de type L ainsi désignées par référence à la notion de grande liaison, sont les "autoroutes" ;
- les routes de type T, pour lesquelles la fonction d'écoulement du trafic de transit à moyenne ou grande distance est privilégiée, sont les "routes express à une chaussée" ;
- les routes de type R, qui constituent l'essentiel des réseaux des voies principales de rase campagne, sont multifonctionnelles ; ce sont les "artères interurbaines" et les "routes".

Chaque type présente plusieurs catégories de route, entre lesquelles il existe des différences qui concernent principalement les caractéristiques techniques minimales du tracé en plan et du profil en long. Le choix entre deux catégories à l'intérieur d'un type permet de tenir compte de la contrainte topographique et de ses implications financières, en modulant les caractéristiques géométriques.

Pour les routes de type R, on distingue les catégories suivantes :

- la catégorie R60 qui, en relief vallonné, permet généralement de réaliser un bon compromis entre les coûts et le confort (pour ce qui concerne les aspects dynamiques) ;
- la catégorie R80 qui est généralement bien adaptée lorsque les contraintes de relief sont faibles.

Pour les routes de type T, on distingue :

- la catégorie T80 qui, en relief vallonné, est généralement bien adaptée compte tenu des objectifs de confort attachés à ce type de route et des contraintes de coût ;
- la catégorie T100 qui est généralement bien adaptée lorsque les contraintes de relief sont faibles.

Pour les routes de type L, on distingue les catégories :

- L1 appropriée en région de plaine ou vallonnée où les contraintes de relief sont modérées ;
- L2 mieux adaptée aux sites de relief plus difficile, compte tenu des impacts économiques et environnementaux qu'il implique.
- Ces catégories L1 et L2 sont respectivement appropriées pour des vitesses maximales autorisées de 130 et 110 km/h.

Le nombre de voies est déterminé après des études préalables prenant en compte des données de trafic, des objectifs de niveau de service et des éléments économiques et politiques. Les routes principales comportent 2 voies, 3 voies ou 2 voies avec des créneaux de dépassement, ou 2 x 2 voies.

La largeur des voies de circulation, en rase campagne, est normalement de 3,50 m pour les routes principales en aménagement neuf.

Sur les routes neuves de type R, la largeur peut être réduite à 3 m en cas de contrainte de site, ou lorsque le trafic total et le trafic lourd sont jugés peu importants. Sur les routes en relief difficile, des largeurs plus réduites peuvent être adoptées.

Pour les route de type L, chaque chaussée comporte de 2 à 4 voies de circulation larges de 3,50 mètres.

### Tracé en plan

Le tracé en plan d'une route doit permettre une bonne condition de sécurité et du confort (Hoang, 2005). Pour chaque catégorie de route, on a des valeurs limites des rayons. Dans le Tableau a. 1, chaque catégorie de route (R, T, L) ainsi que les vitesses de référence (60, 80, 100, 120) sont précisées (SETRA, 1985, 1994).

Catégorie de route	R 60	T 80 et R 60	T 100	L 80	L 100	L 120
Rayon minimal (m)	120	240	425	240	425	665
Rayon non déversé (m)	600	900	1300	900	1300	1800

Tableau a. 1 Caractéristiques limites des rayons du profil en plan

### Profil en long

Le profil en long est caractérisé par les pentes, par les raccordements circulaires avec des rayons limites suivant la catégorie des routes (Hoang, 2005).

Le code de la voirie routière a imposé que les profils en long soient établis de manière à permettre l'écoulement des eaux pluviales et l'assainissement de la plate-forme. Ainsi, il est souhaitable d'adopter les pentes longitudinales minimales de :

- 0,5 % à 1 % pour les zones où le dévers est nul afin d'assurer l'évacuation des eaux de surface ;
- 0,2 % dans les longues sections en déblai afin d'éviter des sur-profondeurs pour le dispositif longitudinal d'évacuation des eaux pluviales.

Pour assurer le confort dynamique et visuel, les paramètres géométriques du profil en long doivent respecter les caractéristiques limites indiquées dans le Tableau a.2

Catégorie de route	R 60	T 80 et R 60	T 100	L 80	L 100	L 120
Déclivité maximale (%)	7	6	5	6	6	5
Rayon minimal en angle saillant (en m)	1500	3000	6000	3000	6000	10000
Rayon minimal en angle rentrant (en m)	1500	2200	3000	2200	3000	4200
Référence	(SETRA, 1994)			(SETRA, 1985)		

Tableau a.2 Caractéristiques limites du profil en long

## ANNEXE 2

### LE MODULE SPATIAL ANALYST D'ARCGIS

#### Présentation

Spatial Analyst est un outil d'aide à la décision qui étudie la répartition et l'organisation d'ensembles d'objets localisables

- Analyse environnementale
  - o Impact sur l'habitat sauvage
  - o Modélisation de la propagation d'un incendie
- Analyse de marché
  - o Implantation du 3ème aéroport.
  - o Proximité des transports
- Analyse sociale
  - o Répartition de l'habitat, des écoles, des zones d'activités.
  - o Accès aux soins médicaux
- Analyse hydrologique
  - o Délimitation des bassins versants.
  - o Modélisation d'une crue et de ses conséquences.
- Analyse du relief
  - o Etude des pentes, de l'ombrage, de l'exposition

Spatial Analyst a des outils d'analyse pour réaliser des requêtes spatiales, des analyses de recouvrement et de surface.

La fonction « analyse de recouvrement » est une opération utilisée pour comparer deux ou plusieurs couches afin de mettre en évidence de nouvelles relations entre les différentes entités.

La fonction « distances et calcul de proximité » permet d'analyser la distance qui sépare des entités et de répondre à des questions telles que : « combien y a-t-il de clients à moins de 2 kilomètres de chacun des magasins ? »

La fonction « isolignes et surfaces » permet d'analyser des changements continus d'attributs dans l'espace comme par exemple l'altitude, la température,...

La fonction « affichage et classification » : une grille possède une symbologie dont la classification peut être modifiée. Une grille peut être interrogée afin d'établir des sélections basées sur ses valeurs, en passant par les options de la table attributaire de la grille ou à l'aide de la calculatrice raster.

#### Calcul des rasters

Calculatrice raster: La calculatrice permet de créer une grille répondant à un ou des critères spécifiques:

- Logiciel permet de réaliser des opérateurs mathématiques en 3 types :
  - + Arithmétique (\*, /, -, mod)

Par exemple : calcul de l'évolution de la population :

Pop90		Pop60		EvolutionPop																																																
<table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td>7</td><td>5</td><td>5</td><td>3</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td></tr> </table>	7	5	5	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	-	<table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td>5</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr> </table>	5	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	2	2	=	<table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td>2</td><td>4</td><td>3</td><td>2</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>-1</td></tr> <tr><td>0</td><td>-1</td><td>-1</td><td>0</td></tr> </table>	2	4	3	2	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	-1	-1	0
7	5	5	3																																																	
1	1	1	1																																																	
1	1	1	1																																																	
1	1	1	2																																																	
5	1	2	1																																																	
1	1	1	1																																																	
1	1	1	2																																																	
1	2	2	2																																																	
2	4	3	2																																																	
0	0	0	0																																																	
0	0	0	-1																																																	
0	-1	-1	0																																																	

+ Booléen (non, et, ou, Xou)

Par exemple :

<table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>2</td><td>3</td><td>3</td></tr> <tr><td>ND</td><td>0</td><td>1</td></tr> </table>	1	1	0	2	3	3	ND	0	1	ET	<table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td>1</td><td>2</td><td>0</td></tr> <tr><td>2</td><td>3</td><td>3</td></tr> <tr><td>ND</td><td>0</td><td>1</td></tr> </table>	1	2	0	2	3	3	ND	0	1	=	<table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>ND</td><td>0</td><td>1</td></tr> </table>	1	1	0	1	1	1	ND	0	1
1	1	0																													
2	3	3																													
ND	0	1																													
1	2	0																													
2	3	3																													
ND	0	1																													
1	1	0																													
1	1	1																													
ND	0	1																													

+ Relationnel (<, =, >).

Par exemple :

Si on désire observer l'évolution de forêt à travers le temps, on peut écrire l'expression suivante :

[Foret1980] < [Foret1990].

La valeur 1 en sortie correspondra aux zones où la forêt s'est étendue entre ces deux années, puis la valeur 0 correspondra aux zones de déforestation.

Foret1990		Foret1980																																																		
<table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td>1</td><td>1</td><td>3</td><td>3</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>3</td><td>3</td></tr> <tr style="background-color: yellow;"><td></td><td>2</td><td>2</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>3</td><td>3</td><td>5</td></tr> </table>	1	1	3	3	0	0	3	3		2	2	0	0	3	3	5	>	<table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td>2</td><td>1</td><td>2</td><td>4</td></tr> <tr style="background-color: yellow;"><td></td><td>0</td><td>3</td><td>4</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>4</td><td>4</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>4</td><td>4</td></tr> </table>	2	1	2	4		0	3	4	1	0	4	4	1	1	4	4	=	<table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr style="background-color: yellow;"><td></td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr style="background-color: yellow;"><td></td><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> </table>	0	0	1	0		0	0	0		1	0	0	0	1	0	1
1	1	3	3																																																	
0	0	3	3																																																	
	2	2	0																																																	
0	3	3	5																																																	
2	1	2	4																																																	
	0	3	4																																																	
1	0	4	4																																																	
1	1	4	4																																																	
0	0	1	0																																																	
	0	0	0																																																	
	1	0	0																																																	
0	1	0	1																																																	

- Faire de l'algèbre d'image
- Calcul de la densité, la pente, crée de la grille d'ombrage.
- Analyse de distances, chercher le plus court chemin.
- Calcul hydraulique : créer d'une grille de direction de flux, grille d'accumulation de flux, réseau hydrographique, bassin versant, calcul de la longueur de flux, suivi de parcours d'une goutte d'eau.
- Logiciel donne des outils de généralisation :
  - Ré-échantillonnage
  - Agrégation
  - Expansion
  - Contraction
  - Nettoyage de limite
  - Affinage

- Filtre majoritaire
- Grignotage
- Groupes par régions

- Combiner des couches : On peut combiner des couches en superposer des caractéristiques, valeurs intéressées des couches, pour créer une nouvelle couche. Ce calcul est peut-être réaliser avec l'analyse couleur afin d'obtenir un résultat visible.

Par exemple :

Couche 1 : Valeurs dans les cellules correspondent au ruban couleur rouge.

1	1	2	2	1
1	1	1	2	2
4	4	3	3	3
4	4	3	3	1
4	4	4	1	1

Couche 2 : Valeurs dans les cellules correspondent au ruban couleur bleu.

2	1	1	1	1
1	1	3	4	4
1	3	2	2	4
1	3	2	2	2
3	3	3	3	3

On s'intéresse dans ce cas les facteurs qui influencent fortement (valeur 3,4), un résultat obtenu en sommes des 2 couches initiales.

0	0	0	0	0
0	0	3	4	4
4	7	3	3	7
4	7	3	3	0
7	7	7	3	3

## ANNEXE 3

## REALISATION DES CARTES DE SENSIBILITE (PROJET N°1)

Le projet N°1 a été utilisé pour réaliser l'ensemble des cartes thématiques : milieu physique, milieu naturel, urbanisme, contexte agricole, patrimoine, paysage. La manière de réaliser les cartes de sensibilité pour chaque thématique est présentée ci-dessous.

**Pour le milieu physique :** la Figure a.1 présente un modèle de calcul de la carte de sensibilité. Les données vecteurs sont tout d'abord converties en rasters grâce à la fonction de conversion d'ArcGIS. La maille des rasters vaut 25 m. Ensuite, à ces rasters sont attribuées des valeurs de sensibilité grâce à la fonction de reclassification. Enfin, la fonction de pondération permet de superposer toutes les sensibilités des enjeux afin d'obtenir la carte de sensibilité de la thématique.

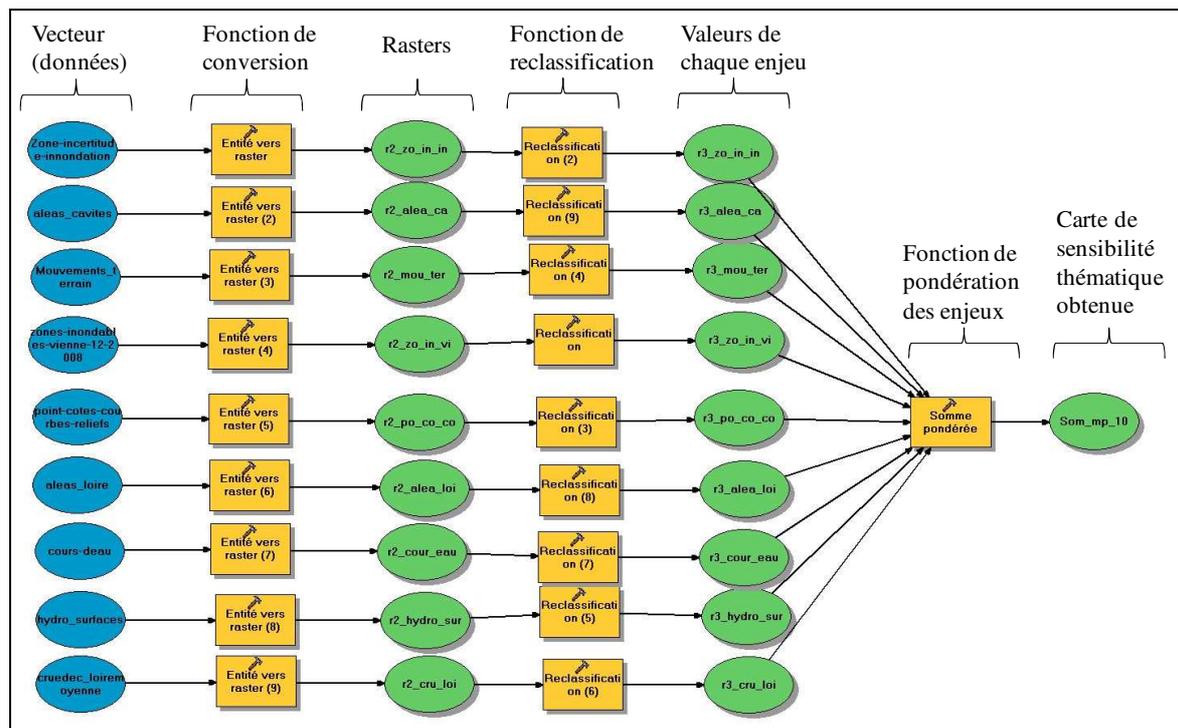


Figure a.1 Modèle de réalisation de la carte de sensibilité du milieu physique

La Figure a.2 présente la carte de sensibilité du milieu physique obtenue selon le modèle présenté en Figure a.1.

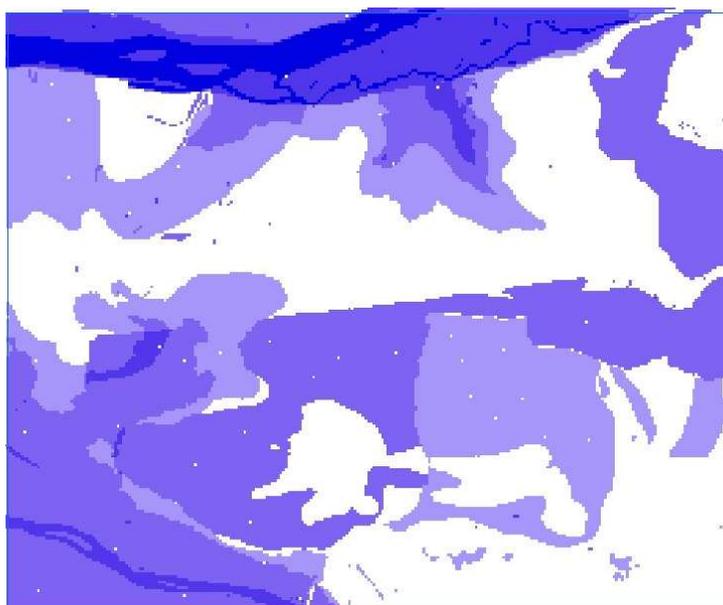


Figure a.2 Carte de sensibilité du milieu physique obtenue par l'addition des valeurs

**Pour le milieu naturel**, on applique la même méthode. On établit un modèle de calcul de la carte de sensibilité comme illustré dans la Figure a.3.

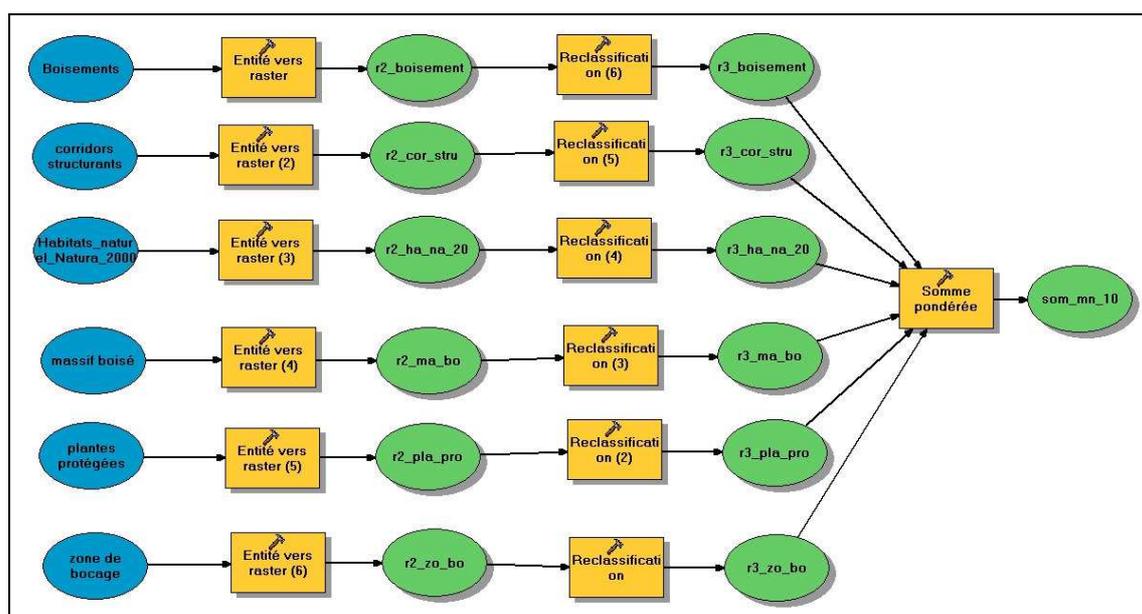


Figure a.3 Modèle de réalisation de la carte de sensibilité du milieu naturel

La carte de sensibilité du milieu naturel obtenue est illustrée dans la Figure a.4

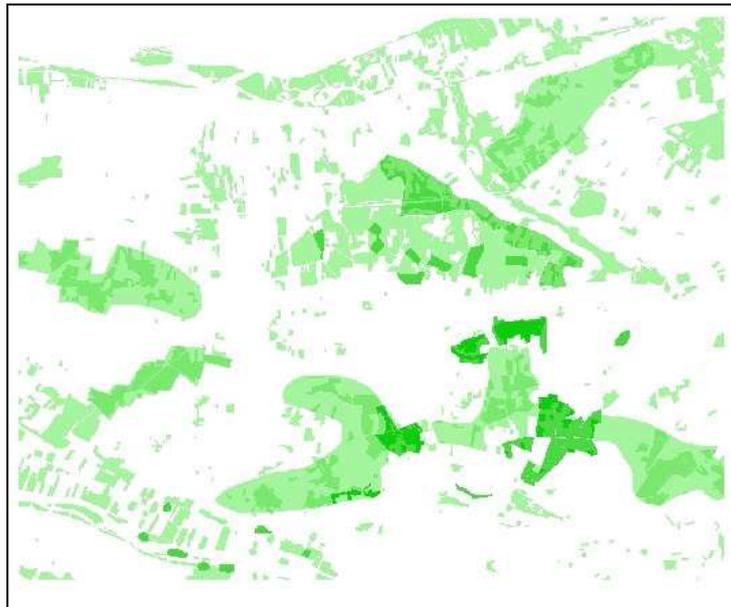


Figure a.4 Carte de sensibilité du milieu naturel

Pour l'urbanisme, d'une façon similaire, on établit un modèle de calcul de la carte de sensibilité comme illustré dans la Figure a.5.

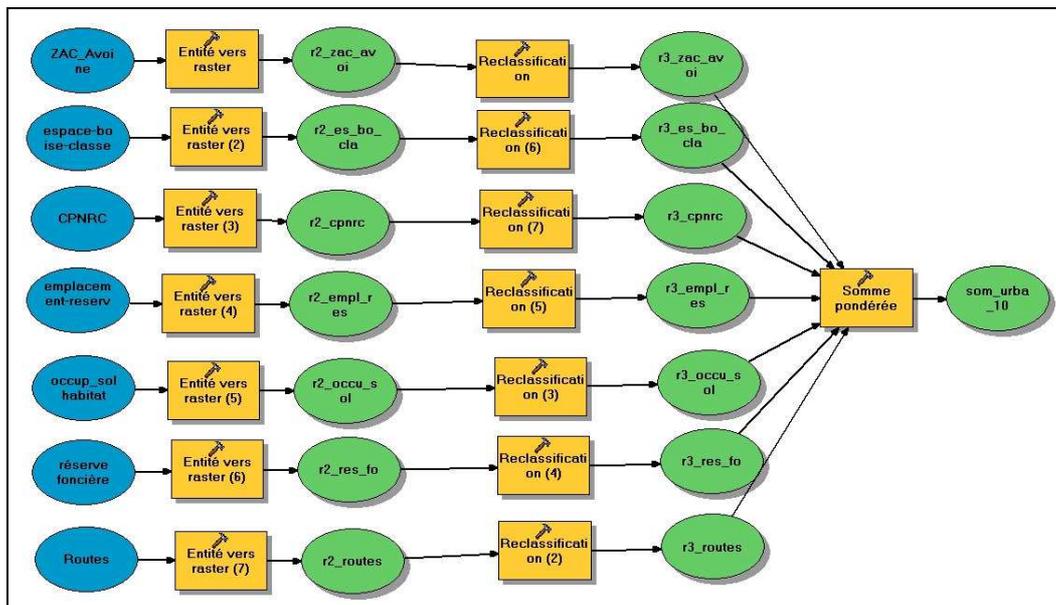


Figure a.5 Modèle de réalisation de la carte de sensibilité de l'urbanisme

La Figure a.6 présente la carte de sensibilité de l'urbanisme obtenue.

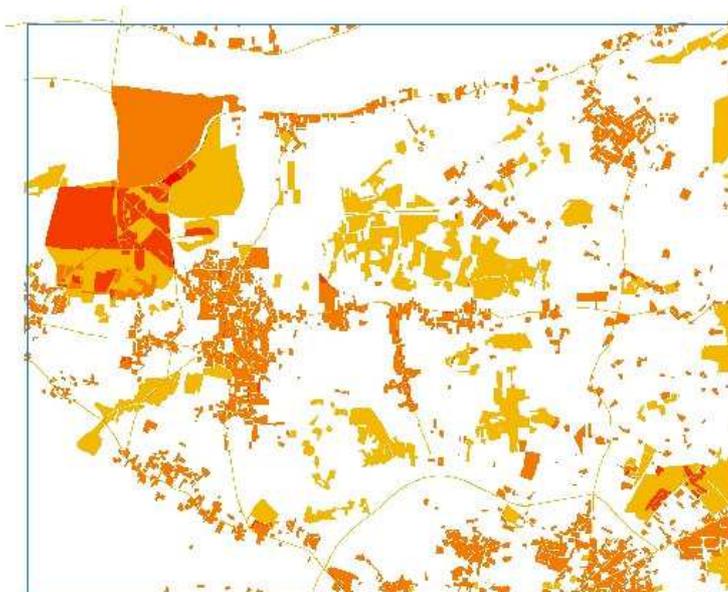


Figure a.6 Carte de sensibilité de l'urbanisme

Pour le contexte d'agricole, on établit un modèle de calcul de la carte de sensibilité comme illustré dans la Figure a.7.

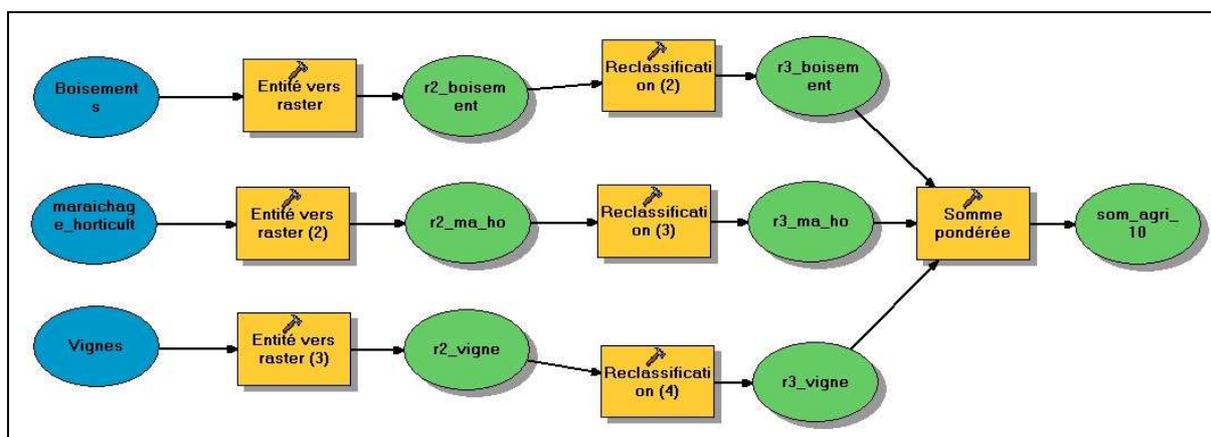


Figure a.7 Modèle de réalisation de la carte de sensibilité du contexte d'agricole

La Figure a.8 présente la carte de sensibilité de l'urbanisme obtenue.



Figure a.8 Carte de sensibilité de contexte agricole

Pour le patrimoine, on établit un modèle de calcul de la carte de sensibilité comme illustré dans la Figure a.9.

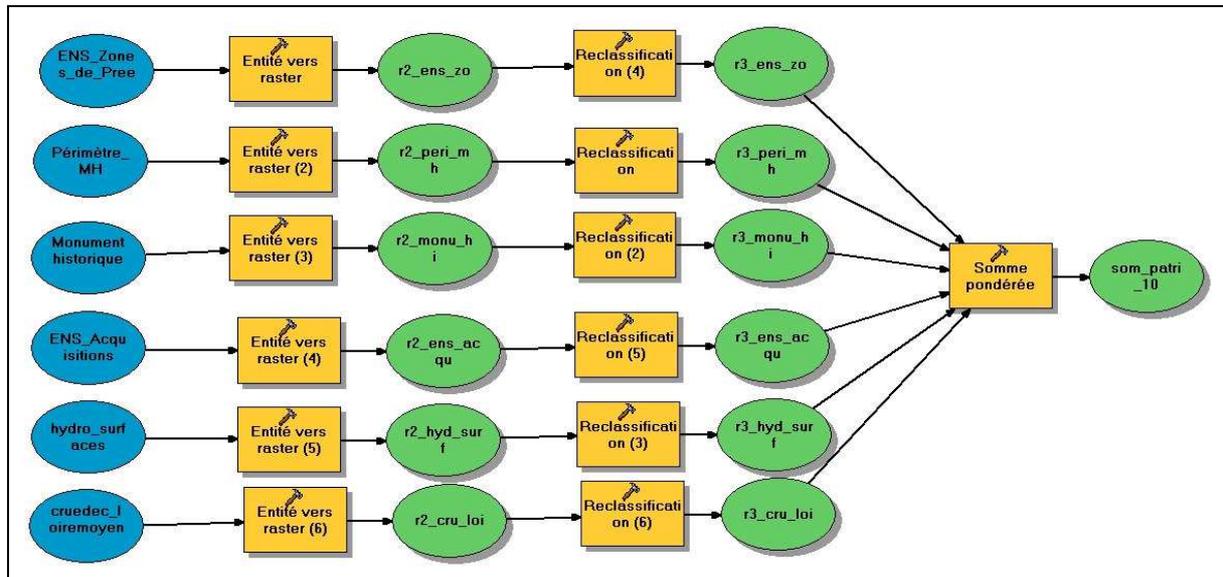
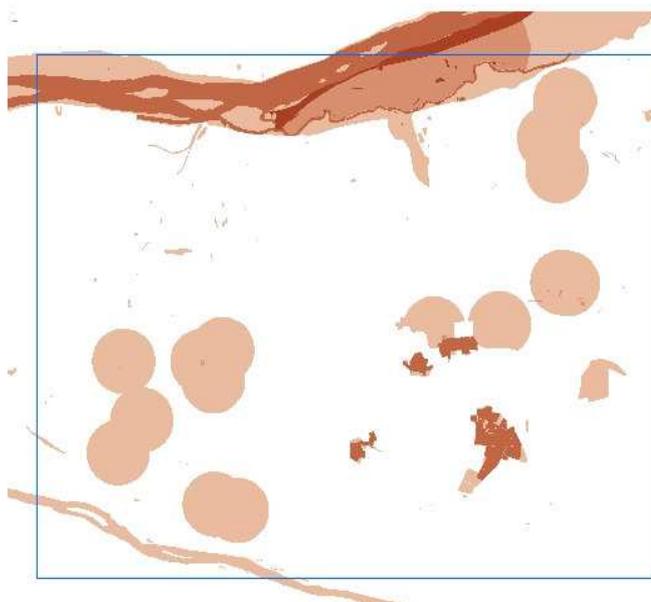


Figure a.9 Modèle de réalisation de la carte de sensibilité du patrimoine

La Figure a.10 présente la carte de sensibilité du patrimoine obtenue.



*Figure a.10 Carte de sensibilité du patrimoine*

**Pour le paysage**, on établit un modèle de calcul la carte de sensibilité comme illustré dans la Figure a.11.

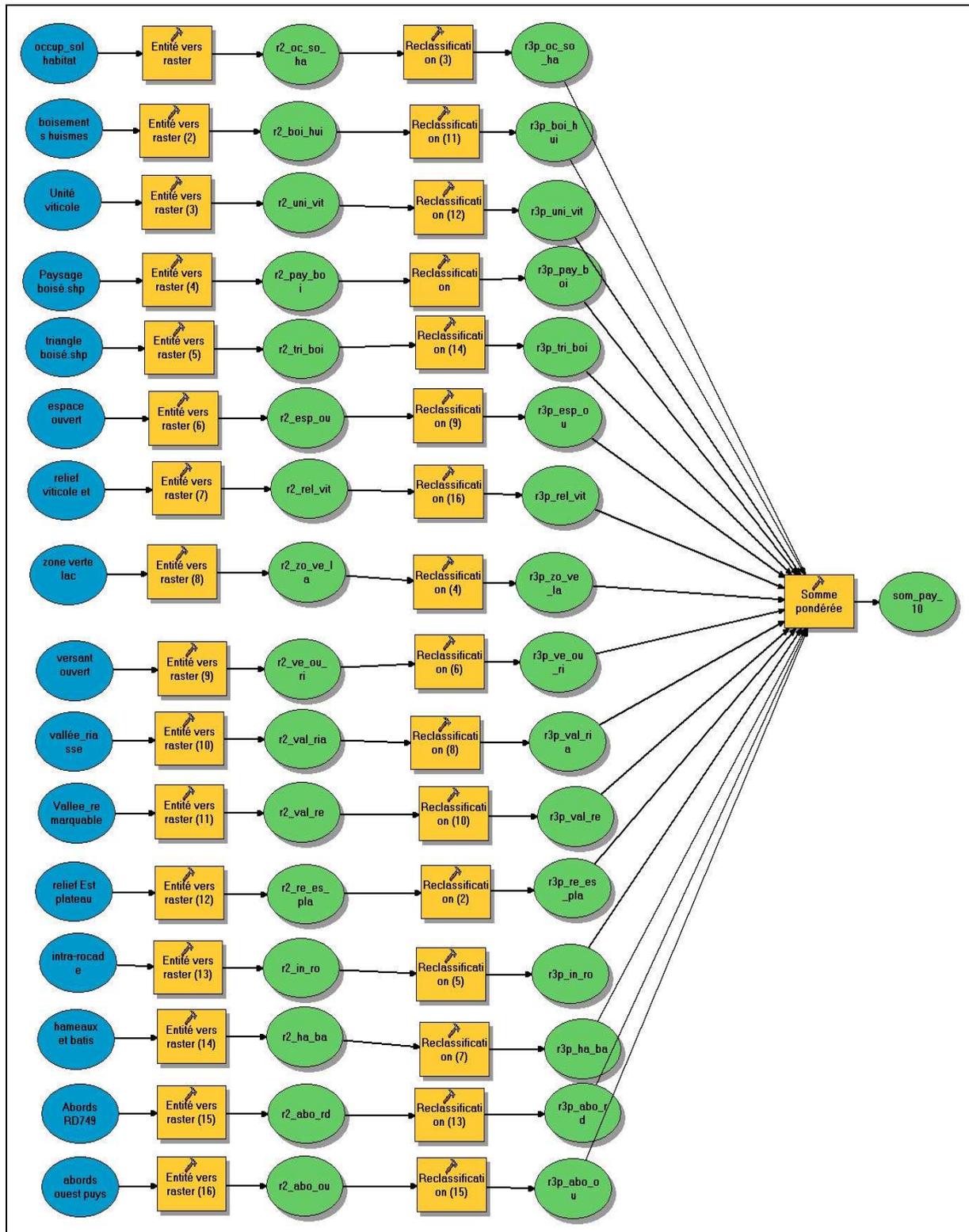


Figure a.11 Modèle de réalisation de la carte de sensibilité du paysage

La Figure a.12 présente la carte de sensibilité du paysage obtenue selon le modèle présenté.



Figure a.12 Carte de sensibilité du paysage

## ANNEXE 4

### LE LOGICIEL ECORCE

ECORCE 1.0 est le premier outil logiciel d'évaluation environnementale développé et qualifié par le LCPC. Il est un produit issu de la méthodologie des modules routiers élémentaires, élaborée dans le cadre de l'opération de recherche 11M042 du LCPC pilotée par l'unité DDGC et intitulée « Approche globale de l'environnement dans le domaine routier ».

Cette méthode vise à réaliser une évaluation globale, au sens du développement durable, selon deux volets :

- l'un désigné par le terme Module Routier Élémentaire (MRE) qui concerne des effets très globaux dans le temps et dans l'espace des pratiques de construction et de maintenance de routes, pour une durée de service à définir : terrassements, assainissement, chaussées, ...
- l'autre désigné par le terme de Module Routier Assemblé (MRA) qui se rapporterait à des effets locaux sur le territoire liés à l'insertion même de la route et aux services qu'elle rend.

#### 1 Les données rassemblées pour saisir un cas d'étude

##### 1.1 Géométrie de chaque couche :

- Epaisseur
- Longueur
- Largeur

##### 1.2 Composition et masse volumique du matériau constitutif de la couche

- Formule de l'enrobé
- Formule du béton
- Formule du grave hydraulique
- Dosage de l'enduit
- Dosage de la couche d'accrochage

##### 1.3 Distance d'acheminement

Les transports des engins et des matériaux sont rarement un poste négligeable au niveau environnemental. Les distances suivantes seront demandées :

- Entre chantier et centrale de fabrication
- Acheminement des matières premières
- Acheminement des matériels

Le logiciel permet d'intégrer n'importe quelle politique d'entretien structurel à partir de la définition de séquences de travaux à réaliser (déconstruction ou reconstruction) et des

années de réalisation des travaux d'entretien comme montré en Figure A.13. Un ou plusieurs entretiens peuvent être pris en compte. La construction initiale peut ou non être intégrée à l'analyse selon le souhait de l'utilisateur.

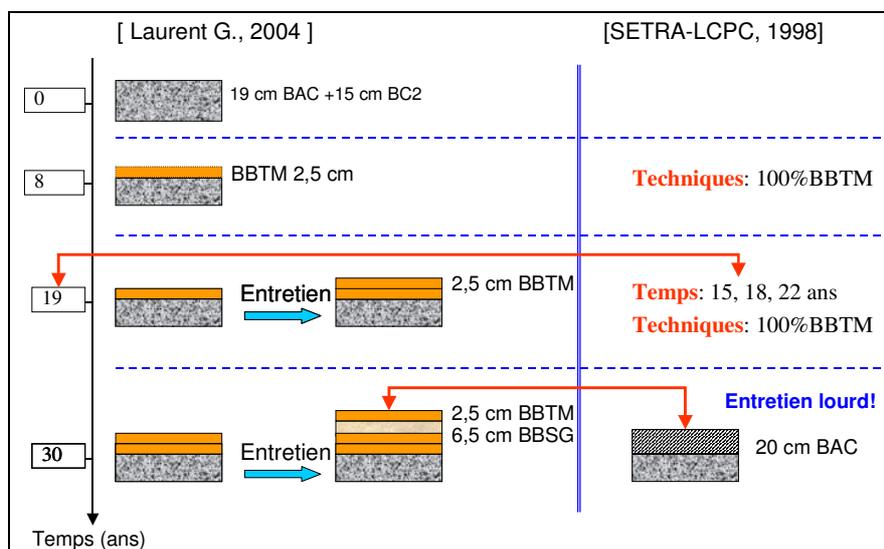


Figure A.13 Exemple de politiques d'entretiens pour une chaussée en BAC

Les données d'entrée de la méthode sont des entrées métier "chaussées", la méthode MRE s'inspire des principes de l'ACV et s'appuie sur l'analyse des flux de matières au sein d'un système. Les résultats sont donnés en particulier en flux d'inventaires de cycle de vie des chaussées étudiées et en valeur d'indicateurs d'impacts environnementaux potentiels, l'ensemble pour une durée de service choisie.

## 2 Principe de calcul avec ECORCE

Ainsi, même si les données d'entrée de la méthode sont des entrées métier "chaussées", la méthode MRE s'inspire des principes de l'ACV et s'appuie sur l'analyse des flux de matières au sein d'un système. Les résultats sont donnés en particulier en flux d'inventaires de cycle de vie des chaussées étudiées et en valeur d'indicateurs d'impacts environnementaux potentiels, l'ensemble pour une durée de service choisie.

La méthode a été élaborée initialement pour des structures de chaussées utilisant des matériaux classiques (liés ou non liés), elle a été étendue aux agrégats d'enrobés dans ECORCE 1.0.

- Le principal verrou à lever est le mode de prise en compte des autres matériaux alternatifs au plan environnemental comparativement à celui d'un matériau classique via les flux et indicateurs utilisés.

La collecte de données environnementales à toutes les étapes de l'élaboration des matériaux de leur extraction en tant que ressources jusqu'à leur vie en place dans l'ouvrage est une étape essentielle de l'évaluation.

- La disponibilité des données environnementales à tous les stades de l'élaboration des ressources reste un élément limitant des potentialités d'ECORCE 1.0.

Les calculs internes au logiciel sont de nature environnementale ; ils s'appuient sur des indicateurs disponibles dans la littérature scientifique.

- Certains des indicateurs choisis font l'objet d'un consensus international clair, d'autres sont encore en discussion dans la communauté scientifique.

Le présent document se rapporte au développement logiciel effectué dans le cadre ci-dessus mais restreint aux limites suivantes :

- seul le cas du MRE chaussées est traité, les travaux de terrassement ne sont pas inclus. Ils répondent à une logique "métier" différente de l'entrée utilisateur de l'outil ECORCE créée pour une mise en application par des spécialistes des chaussées ;
- l'évaluation globale pratiquée est de nature purement environnementale et est inspirée de la méthode normalisée d'Analyse de Cycle de Vie.

La méthode a été élaborée initialement pour des structures de chaussées utilisant des matériaux classiques (liés ou non liés), elle a été étendue aux agrégats d'enrobés dans ECORCE 1.0.

La Figure A.14 illustre les principales étapes de saisie de données, calculs et sortie de résultats d'ECORCE 1.0.

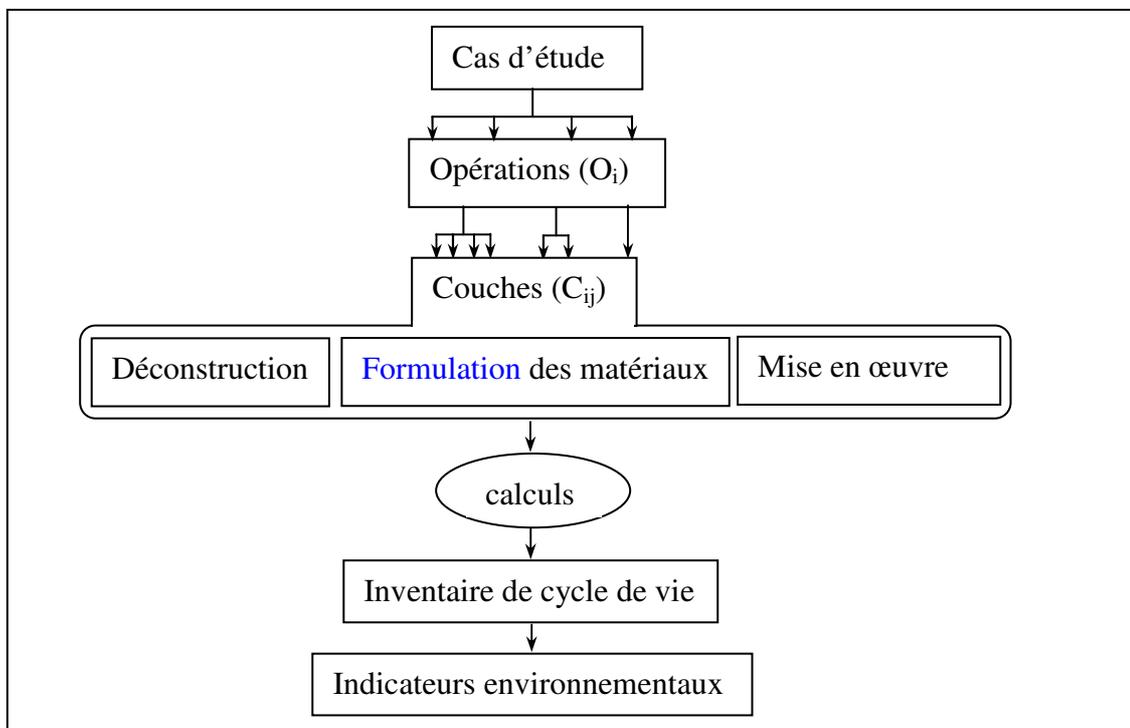


Figure A.14 Organigramme général d'ECORCE 1.0

### 3 Sortie de calcul avec ECORCE

Les sorties du logiciel sont des grandeurs environnementales rapportées au cas d'étude, ou détaillées par opération ou par couche de chaussée :

- ressources en matériaux consommés et matériaux produits,
- énergie primaire totale et eau consommées,
- indicateurs de catégories d'impacts suivantes : effet de serre, acidification, eutrophisation, ozone troposphérique, écotoxicité, toxicité chronique,

- liste détaillée des flux d'inventaire par compartiment d'émission (air, eau, sol) et/ou ressources consommées.

Hormis pour les matériaux et les inventaires, une liste de valeurs unitaires pour chaque résultat est également affichée à l'écran pour l'utilisateur, par tonnes ou m<sup>3</sup> de matériaux, permettant une vérification aisée des ordres de grandeur de résultats.



La Figure a. 17 présente le niveau sonore de 54 dB(A)

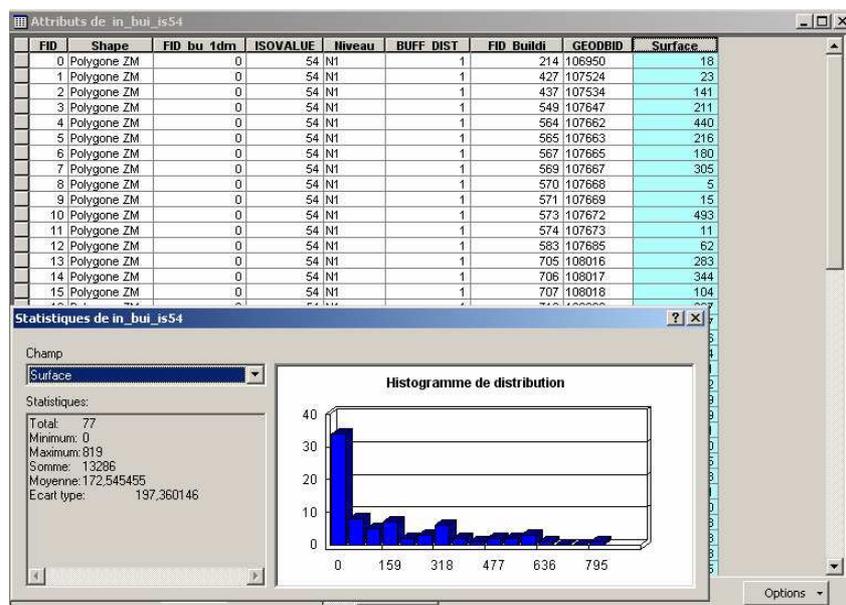


Figure a. 17 Statistique de calcul sur l'isophone 54dB (A)

## **RESUME**

Se basant sur les avancées techniques et scientifiques dans les domaines des systèmes d'information géographique et des indicateurs sociaux et environnementaux, l'objectif de cette thèse est de contribuer au développement d'un outil informatique d'aide à l'identification et à l'évaluation de variantes de tracés routiers.

Le rôle du bureau d'étude en aménagement dans la conduite des projets routiers, ses besoins en matière de développement d'outil et les méthodes d'évaluation préexistantes sont d'abord présentés.

On étudie ensuite les possibilités d'automatisation du traitement des données géographiques de l'aire d'étude d'un projet, permettant de faire ressortir les zones les plus propices à l'insertion de tronçons routiers (sur la base des fonctionnalités du logiciel ArcGIS).

Afin d'améliorer et approfondir l'évaluation des variantes et d'aider à la sélection entre tracés, des indicateurs nouveaux relatifs aux effets globaux et locaux des tronçons routiers, sont proposés. Ils concernent les impacts environnementaux de type d'analyse de cycle de vie, la fragmentation des écosystèmes, la sécurité des transports, le patrimoine, les nuisances sonores, la co-visibilité et le rayonnement.

Leur applicabilité et leur pertinence sont testées dans la comparaison de variantes d'un projet réel. Afin de répondre aux besoins du processus de concertation, une méthode interactive de combinaison des indicateurs est proposée.

Enfin, les potentialités de développement de ces fonctions sous forme d'outil opérationnel pour le bureau d'étude, sont discutées.

## **ABSTRACT**

### **A geo-located evaluation method for the integration of road projects in territories and the choice of variants**

Based on the advanced technique and science in the domains of the geographic information and the social and environmental indicators, the objective of this thesis is to contribute to the development of a tool for helping the road variants identification and evaluation.

The role of the construction design office in the road projects driving, its needs for a tool development and the pre-existent evaluation methods are presented at first.

Then we study the automation possibilities for treatment the geographical data of the project study area, allowing to highlight the most convenient zones for road section integration (based on the ArcGIS software functions).

To improve and go deeper in the variants evaluation and to help in the route selection, new indicators relative to global and local effects of the road sections, are proposed. They concern the global environmental impacts from life cycle analysis type, the fragmentation of ecosystems, the safety of transport, the built heritage, the noise pollution, the co-visibility and the radiance.

Their applicability and their relevance are tested in road variant's comparison of a real project. To answer to the needs of the coordinating process, an interactive method of indicators combination is proposed.

Finally, the potentialities of development of these functions in the form of an operational tool for the design office, are discussed.