



HAL
open science

Aide à la décision robuste pour la localisation d'un centre de traitement des déchets

Daniel Gourion, Didier Josselin

► **To cite this version:**

Daniel Gourion, Didier Josselin. Aide à la décision robuste pour la localisation d'un centre de traitement des déchets. *Annales de l'ISUP*, 2012, Numéro spécial Robustesse, 56 (2-3), pp.17-36. hal-01091386

HAL Id: hal-01091386

<https://hal.science/hal-01091386>

Submitted on 21 Mar 2022

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.

AIDE À LA DÉCISION ROBUSTE POUR LA LOCALISATION D'UN CENTRE DE TRAITEMENT DES DÉCHETS. COMPARAISON DE MÉTHODES D'ANALYSE MULTICRITÈRES

PAR DANIEL GOURION*[§] ET DIDIER JOSSELIN*[¶]

[§] *L.A.N.L.G., Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse*
et [¶] *U.M.R. ESPACE, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse*

Résumé. Ce papier est une étude d'un cas réel de localisation d'équipement collectif. Nous reprenons l'étude commandée par la collectivité à un prestataire afin de choisir le meilleur candidat parmi six pour accueillir un centre de traitement des déchets ultimes. La méthode utilisée, qui fournit un vainqueur indiscutable est étudiée. Des méthodes alternatives sont proposées qui permettent de montrer que d'autres candidats auraient pu émerger.

Abstract. This case study paper deals with decision making for the choice of a waste processing center. We explain a multicriteria analysis provided by an office, in charge of finding the best site candidate (among six) to optimally locate a landfill site of household wastes. This method is discussed and faced to alternative methodologies from which other optimal candidates could be selected.

1. Introduction. Les méthodes multicritères d'aide à la décision (voir [1] pour une introduction) peuvent se rendre très utiles dans le domaine des politiques publiques d'aménagement du territoire. En particulier, la localisation d'équipements collectifs se prête bien à l'utilisation de ce genre de techniques, car de multiples objectifs, parfois conflictuels, doivent être satisfaits simultanément (cf. [2], [3]). Cependant, on constate que lorsqu'ils sont placés devant la question de choisir un site parmi plusieurs candidats, les collectivités et les bureaux d'études se contentent le plus souvent d'utiliser des méthodes très simples, qu'ils estiment rodées et efficaces, sans se questionner sur leur impact. Un exemple d'une telle méthode fréquemment utilisée est celle de la somme pondérée.

Pour illustrer ce propos, nous prendrons dans cet article l'exemple de la localisation d'un centre d'enfouissement des déchets ultimes, dont la problématique est décrite en seconde section. Dans la troisième section, nous décrirons précisément le problème posé et comment le bureau d'études mandaté par les collectivités a opéré pour le traiter. La quatrième section sera consacrée à l'étude de quelques méthodes alternatives de décisions multicritères. Puis dans la conclusion, nous ferons une synthèse des différents résultats obtenus, permettant de proposer une réponse « robuste »

*. Projet financé par l'Agence Nationale de la Recherche
Classification AMS (2000) : Primary 90B50, 90C31 ; secondary 90C29
Mots-cléfs : aide à la décision, robustesse, localisation optimale

au problème posé, ainsi qu'une ouverture sur la façon dont devrait selon nous être abordée l'aide à la décision dans un tel cas.

Cet article est avant tout un article pédagogique et de sensibilisation à la complexité de l'aide à la décision. Ainsi, il ne s'agit pas de proposer une méthode inédite et a priori meilleure que celle utilisée par le bureau d'études, mais de montrer, au travers d'un exemple réel, que les problèmes d'aide à la décision sont complexes car le résultat dépend des critères pris en compte, de leur évaluation, de leur pondération et de la méthode utilisée pour classer les différents candidats.

2. Contexte géographique. Dans cette section, nous fournissons des informations de cadrage sur le centre de traitement des déchets ménagers du Roannais.

2.1. *La problématique de la localisation des centres de traitement des déchets.* La gestion de nos déchets représente d'importants enjeux de différentes natures. La directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008 a fixé des objectifs ambitieux, traduits en droit français (loi numéro 2009-967 du 3 août 2009, article 46). Les principaux sont de réduire la production d'ordures ménagères et d'augmenter le recyclage matière et organique (compostage). Les modes de traitement des déchets peuvent être divisés en quatre catégories : le stockage, l'incinération, le recyclage et le compostage. Le recours à ces différentes techniques varie selon chaque pays. Selon un rapport du sénat [4], la France se caractérise par la place importante accordée à l'incinération (36 %) et à la mise en stockage (34 %) par rapport au recyclage (16 %) ou au compostage (14 %). La loi impose cependant que l'enfouissement en centre de stockage soit limité au déchets dits ultimes ne pouvant faire l'objet de recyclage ou valorisation. Le rapport précise d'ailleurs que pour la partie stockage, les installations ont été réduites passant de 500 sites en 1992 à 303 en 2006. Si leur nombre semble suffisant, elles connaissent toutefois un problème de saturation et de répartition sur le territoire. La localisation optimale des centres de déchets ultimes reste donc un problème à la fois important et sensible pour nos territoires.

Du projet d'installation d'un tel équipement dont il est difficile d'ignorer les nuisances, découle une situation de politique d'aménagement très délicate à gérer. Cette situation est caractéristique d'un conflit que l'on nomme communément « Not In My BackYard » (NIMBY, « pas dans mon arrière-cour »). Les oppositions locales ne portent pas principalement ici sur des questions foncières, contraintes généralement les plus génératrices de conflits de voisinage, mais davantage sur un ensemble de facteurs sociaux et environnementaux au sujet de l'acceptabilité du projet et notamment des nuisances perçues sur le long terme par les populations proches de la localisation du centre. Dans une telle situation, la notion d'« optimalité » du centre peut revêtir de multiples facettes. Faut-il localiser le centre de déchets au plus proche des populations émettrices, quitte à perdre en qualité de vie directe (bruit, odeurs, pollutions potentielles des nappes phréatiques à long terme) ? Ou bien faut-il minimiser ces nuisances et prendre alors la décision de placer le centre pour qu'il se situe

dans des zones géographiques moins peuplées ? On voit ici l'importance de bien poser le problème et de se fixer un objectif clair et précis pour une localisation optimale. Dans un cas, on va chercher à minimiser les distances parcourues par les véhicules transportant les déchets. Dans l'autre, on visera à réduire les nuisances et donc à maximiser la distance séparant le centre des habitations. Dans le cas concret qui nous occupe, il semble que la collectivité ayant en charge le traitement des déchets n'ait pas réalisé cet arbitrage. Le processus de sélection du meilleur site, basé apparemment sur un ensemble de critères techniques et environnementaux, a choisi un site extérieur aux zones les plus densément peuplées, déclenchant malgré tout un conflit de type « NIMBY », les communes concernées ne souhaitant pas voir le centre installé dans leur voisinage.

2.2. *Le cas particulier du centre de traitement des déchets du Roannais.* Le travail résumé dans cet article s'inscrit dans le cadre d'un projet pluridisciplinaire de recherche financé par l'ANR Systèmes Complexes : Robust Optimal Locations for Sustainable Systems and Environment (ROLSSES). Ce projet associe des laboratoires de géographie et de mathématiques ainsi que différents partenaires opérationnels dont la COMMUNAUTÉ D'AGGLOMÉRATION DU PAYS ENTRE LOIRE ET RHÔNE (C.O.P.L.E.R.). Cette collectivité a récemment été choisie par le Syndicat d'Etudes et d'Élimination des Déchets du Roannais (S.E.E.D.R.) pour « accueillir » le centre d'enfouissement des déchets du Roannais, sur la commune de Saint-Priest-la-Roche. Ce choix a été effectué après une comparaison réalisée par un cabinet d'études de six sites candidats par une analyse multicritère. Ces sites sont les suivants (cf. Figure 1) :

- C1 : Dancé
- C2 : Saint-Priest-la-Roche
- C3 : Parigny
- C4 : Mably
- C5 : Noailly
- C6 : Pouilly-sur-Charlieu

Avant d'aborder le problème multicritère dans les sections 3 et 4, nous pouvons identifier le « meilleur » des sites candidats en minimisant, sur le réseau de routes en fonction des vitesses autorisées, la somme des temps d'accès des véhicules transportant les déchets de leurs lieux de production (liés à la population, cf Figure 2) jusqu'au centre d'enfouissement (critère dit de p-médiane). Dans ce cas précis, le candidat optimal est alors C3 (cf. Figure 3). Cependant, bien d'autres critères que la simple distance au centre de traitement de déchets sont en jeu. Étudions maintenant quelle a été la démarche proposée par le bureau d'étude ayant eu la charge de localiser le centre optimal, en fonction d'une batterie imposante de critères.

3. Analyse effectuée par le bureau d'études. Dans cette section, nous détaillons et commentons la façon dont le bureau d'études a traité ce problème d'aide à la décision. Notons tout d'abord qu'une étude préalable, sur laquelle nous ne reviendrons pas, a conduit à pré-sélectionner les six sites candidats pour accueillir cet

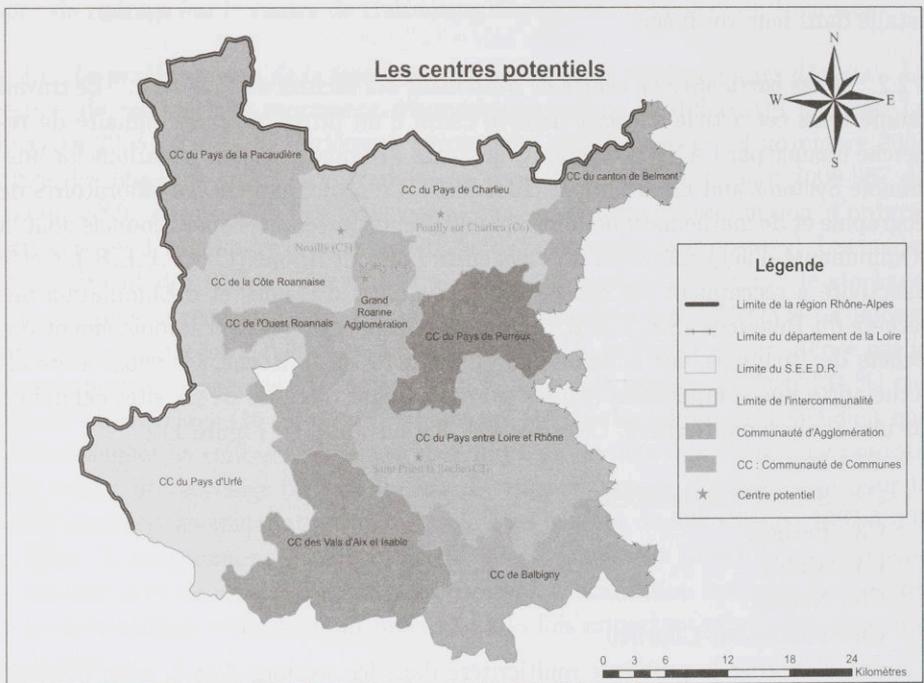


FIGURE 1. *Communités de Communes et sites potentiels*

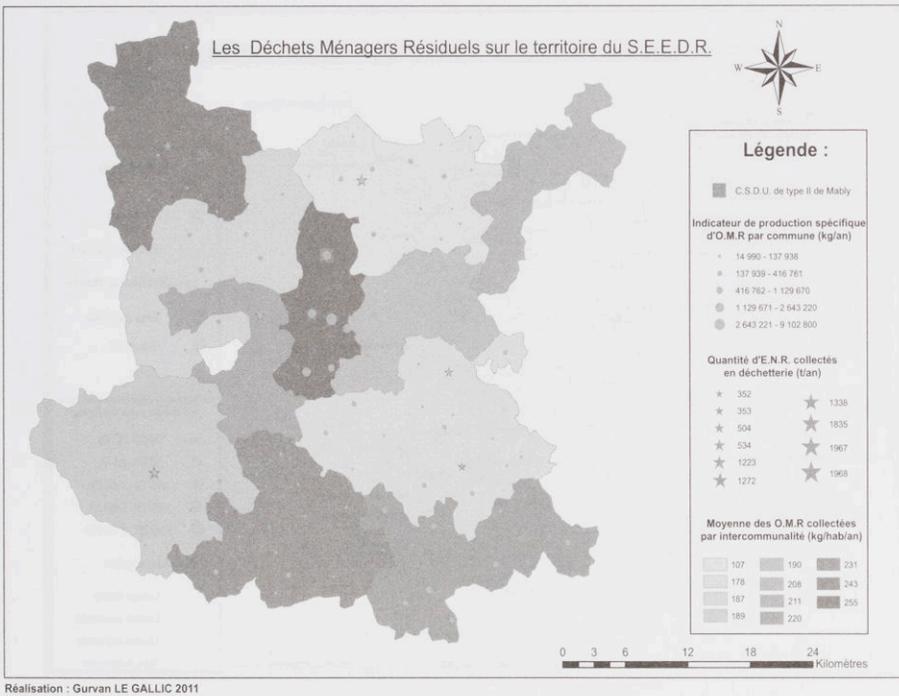


FIGURE 2. Répartition des Ordures Ménagères Résiduelles (OMR) et des déchets sous forme d'Énergie Renouvelable (ENR)

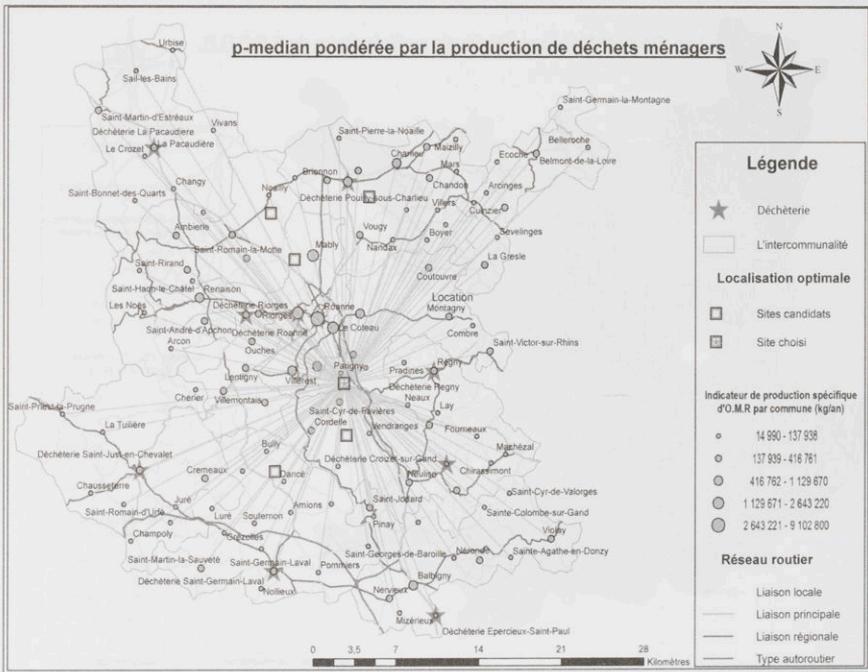


FIGURE 3. Centre optimal déterminé par la P-médiane (*p-median*) minimisant la somme des temps d'accès sur le réseau routier

équipement.

3.1. *Choix des critères.* Ces six sites ont été évalués selon 4 grandes catégories :

- acceptabilité technique,
- environnement naturel,
- environnement socio-économique,
- économie (ou coût).

Chaque catégorie a été divisée en un certain nombre de thèmes. Par exemple, la catégorie environnement naturel contient deux thèmes, paysage et milieux naturels.

Ainsi :

- acceptabilité technique contient 7 thèmes,
- environnement naturel contient 2 thèmes,
- environnement socio-économique contient 5 thèmes,
- économie (ou coût), contient 4 thèmes,

soit un total de 18 thèmes. Voir Table 1 pour les détails.

Enfin, chaque thème a été évalué en fonction d'un certain nombre de critères, allant de un à six selon les thèmes. Par exemple, le thème aménagement accès de la catégorie économie ne contient que le critère réseau routier existant. En revanche, le thème agriculture de la catégorie environnement socio-économique contient 6 critères. L'intégralité des critères est disponible Table 6.

En résumé :

- acceptabilité technique, contient 7 thèmes et 21 critères,
- environnement naturel, contient 2 thèmes et 8 critères,
- environnement socio-économique, contient 5 thèmes et 17 critères,
- économie (ou coût), contient 4 thèmes et 7 critères.

Les six sites candidats sont évalués quantitativement par des notes allant de 1 (meilleure note) à 4 (plus mauvaise note) pour chacun des critères. Le détail des notes figure en annexe, Table 6.

3.2. *Valuation des critères.* Une bonne partie du travail réalisé par le bureau d'études a été d'évaluer la qualité des différents sites candidats au regard des 53 critères. Bien évidemment, le choix des critères retenus et la façon d'évaluer la qualité des candidats pour ces différents critères influent grandement sur le site retenu. Cependant, nous nous abstenons de discuter ces points qui ne sont pas de notre compétence.

Disons tout de même quelques mots sur la notation des critères : comme déjà dit, ceux-ci sont notés de 1 à 4, la meilleure note étant 1. L'homogénéité de l'échelle pour les différents critères est une bonne chose. Cependant, elle pose quelques problèmes pratiques, que nous soulevons rapidement.

Commençons par les critères quantitatifs. Le problème principal est la discontinuité de la note en fonction de la valeur réelle du critère. Ainsi le critère qualité de la desserte donne une note de 3 aux sites dont la distance à une voie structurante est comprise entre 4 et 5 kms et une note de 2 à ceux dont la distance est comprise entre

TABLE 1
Notes pondérées totale, des différents thèmes et catégories.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Géologie	2,33	2	2	1,67	1,67	1,67
Hydrogéologie	2,33	2,33	2	2,67	2	2,67
Eaux superficielles	2,33	1,67	1,33	2	3	2
Accès	2	3	2,4	1,6	3	2,8
Distance et trafic	2	2,5	1,5	1,5	2	3
Morphologie	1,67	1,33	2,33	3	3,33	3,33
Foncier	3	1	3,5	1	3	4
ACCEPTABILITE TECHNIQUE	15,67	13,83	15,07	13,43	18	19,47
Paysage	2,2	3	3	2	3,4	2,2
Milieus naturels	3,33	2,67	1,67	2,67	1,67	2
ENVIRONNEMENT NATUREL	5,53	5,67	4,67	4,67	5,07	4,20
Agriculture	3	2,67	3	2,17	3	2,67
Habitat	4	3	4	4	3,5	4
Urbanisme	2	1	4	4	2	3
Tourisme	2,25	2,25	2,25	2,5	2,25	2,75
Industrie Commerce Artisanat	2	1,5	1,5	3	2	1,5
ENVIRONNEMENT SOCIO-ECONOMIQUE	13,25	10,42	14,75	15,67	12,75	13,92
Aménagement accès	2	4	2	2	4	4
Achat terrain	2	1	3	4	3	3
Investissements projet	2	1,75	3,25	2	2,5	2
Coût de transport	4	3	2	2	3	3
ECONOMIE	10	9,75	10,25	10	12,5	12
TOTAL	44,45	39,67	44,73	43,77	48,32	49,58

2 et 4 kms. Le découpage n'est pas linéaire : la note 2 correspond à un intervalle de 2 kms et la note 3 à une plage de 1 km. Par ailleurs, deux sites situés respectivement à 3,9 et 4,1 kms d'une voie structurante auront deux notes différentes alors que deux sites situés à 2,1 et 3,9 kms auront la même note. Il aurait été possible d'éviter cet écueil en admettant des notes non entières pour les valeurs quantitatives, tout en les contenant entre 1 et 4.

En ce qui concerne les critères qualitatifs, la même critique peut parfois s'appliquer car beaucoup d'entre eux sont qualitatifs par défaut : par exemple les coûts sont évalués comme faibles, moyens, élevés ou très élevés et sont donc faussement qualitatifs.

3.3. *Pondération des critères.* Une étape classique partagée par un certain nombre de méthodes d'aide à la décision est de fixer un poids pour chaque critère. Ce poids représente l'importance du critère en question dans le processus de décision. Un critère d'importance mineure aura un poids faible et un critère primordial aura un poids élevé.

Ici les critiques concernant la méthodologie employée deviennent plus sérieuses. En effet, on notera tout d'abord que chaque thème a été affecté d'un poids unité (voir Table 6 en annexe). Cela signifie que chaque thème a exactement la même

importance. Ce choix n'est, à notre connaissance, expliqué nulle part et ne semble pas avoir d'autre justification que la facilité ou la difficulté de hiérarchiser les priorités. Par exemple, pour quelle raison le thème habitat a-t-il exactement la même importance que le thème accès ? La même démarche peu opportune est utilisée pour les critères : ainsi tous les critères d'un thème donné sont affectés du même poids. Il est cependant délicat de critiquer ici le bureau d'études. Il est possible qu'il ait été laissé devant la tâche de fixer les poids, alors que le décideur, à savoir la S.E.E.D.R., aurait dû prendre cette responsabilité.

Ce choix en apparence égalitaire de donner la même importance à chaque thème est en réalité un choix arbitraire qui a des conséquences importantes. La première d'entre elles est que les quatre grandes catégories de critères décrites ci-dessus ont des influences très inégales dans le choix final : acceptabilité technique, environnement naturel, environnement socio-économique et économie ont un poids total respectif de 7, 2, 5 et 4 et représentent respectivement 39%, 11%, 28% et 22% de la note finale. Est-ce réellement ce que souhaite le décideur ?

Il aurait été préférable de fixer en amont l'importance relative des quatre catégories. Une fois ceci effectué, il aurait été possible d'affiner, en demandant au décideur l'importance relative de chaque thème à l'intérieur de chaque catégorie. Il est également probable qu'il existe différents points de vue des décideurs. Mais il vaut mieux prendre en compte ces éventuelles différences d'opinions sur les pondérations, quitte à les moyenner ou à les étudier séparément, plutôt que de tout uniformiser de façon arbitraire.

3.4. Méthode employée. La méthode de décision utilisée est la somme pondérée. Chaque note est multipliée par le poids affecté au critère correspondant, on calcule ensuite la somme pour chaque candidat de tous les résultats obtenus. Le candidat obtenant la note la plus faible est déclaré le meilleur. Cette méthode, purement quantitative, a pour elle sa facilité de mise en oeuvre et paraît souvent la plus naturelle aux utilisateurs et aux décideurs, généralement étrangers aux multiples outils de l'aide à la décision. Elle permet de plus d'obtenir un classement totalement hiérarchisé des différents candidats du premier au dernier. Elle est très communément utilisée par les bureaux d'étude spécialisés dans les impacts sur l'environnement de mise en place d'infrastructures.

Cependant, elle a aussi des limites, et il faut en relativiser les conclusions. Donnons un exemple volontairement simple pour illustrer une de ces limites : trois candidats A, B et C sont évalués selon une note technique et une note financière. Chacune est notée sur 20. Plus la note est élevée, meilleure elle est. Le candidat A obtient les notes respectives 18 et 4, B obtient 10 et 10 et C obtient 5 et 18. Dans ce cas, bien que B soit évidemment un candidat de compromis naturel, aucun choix de poids ne pourra le faire apparaître comme vainqueur de la compétition entre les 3 candidats. Ce qui est en cause ici est le caractère totalement compensatoire de la somme pondérée. En d'autres termes plus familiers, on additionne des choux et des carottes. Par ailleurs, peut-on raisonnablement prétendre ordonner des candidats

du premier au dernier alors qu'ils sont jugés selon des critères multiples et souvent contradictoires ? Pour conclure, on peut dire qu'il s'agit d'une méthode relativement naïve d'aide à la décision, peu employée par les spécialistes du domaine.

Les résultats obtenus sont présentés dans la Table 1. Comme on le voit, le candidat C2 est le candidat retenu par cette méthode et ce choix de poids, devant un groupe composé de C4, C1 et C3. Les candidats C5 et C6 sont clairement distancés.

4. Approches alternatives. Nous allons dans cette section utiliser différentes méthodes d'aide à la décision pour identifier le (ou les) meilleur(s) candidat(s).

4.1. Méthode de pondération. Nous reprenons ici la méthode du bureau d'études en nous autorisant des choix de poids différents. En effet, comme évoqué dans la Section 3.3, le choix des poids utilisé dans l'étude qui a été menée par le prestataire (appelons-le P_0) peut paraître arbitraire. Il semble d'ailleurs à la lecture du rapport d'études que la possibilité de distribuer différemment les poids ait été envisagée, même si les calculs afférents n'ont pas été effectués ou, du moins, pas rendus publics.

Détaillons quelques possibilités, étant entendu que la possibilité la meilleure (le décideur indique les poids les plus appropriés) n'est malheureusement pas accessible.

La possibilité la plus logique est de donner le même poids à chacune des 4 grandes catégories, soit un poids de 1 à acceptabilité technique, environnement naturel, environnement socio-économique et économie. Cela revient à dire que chacune de ces 4 catégories a la même importance, ce qui peut sembler plus équitable que la solution retenue par le prestataire.

On peut distinguer alors 2 cas. Dans le premier cas P_1 , on garde des critères de poids égaux à l'intérieur de chaque catégorie. Cela signifie que les 21 critères d'acceptabilité technique ont un poids de $1/21$ et que les notes finales sont réparties entre un minimum théorique de 4 et un maximum théorique de 16. On obtient alors le fait que C2 est le candidat le mieux classé, mais est quasiment ex-aequo avec le candidat C4 : la différence n'est pas significative. Le candidat C1 complète le tiercé. Dans le second cas P_2 , on garde un poids égal pour chaque thème. Par exemple, les 7 thèmes d'acceptabilité technique ont un poids de $1/7$. À l'intérieur d'un thème donné, les critères ont tous le même poids. On obtient alors plus ou moins le même ordre que précédemment : C2 est le candidat le mieux classé, devant C4, C3 et C1 dans cet ordre mais assez proches entre eux.

Une possibilité plus drastique P_3 est de donner un poids de 1 à chaque critère. Les trois meilleurs candidats sont alors C2 puis C4 puis C1. Autrement dit, les méthodes de somme pondérée semblent privilégier le candidat C2. Cependant le classement obtenu ne doit pas dissimuler la faiblesse des écarts entre certains candidats : ainsi C4, voire à la limite C1, ne sont pas à négliger. En particulier, avec le choix de poids P_1 , l'écart d'entre C4 et C2 n'est que de 0,08 sur une échelle de note de 4 à 16, soit moins de 1% de l'écart maximal possible. Avec le choix P_2 , cet écart représente 4,7%, avec P_3 3,2%, tandis qu'avec P_0 on obtient 7,2%. Ces écarts sont relativement minimes.

Comme les préférences réelles des décideurs ne sont pas connues, nous avons fait des simulations avec des poids choisis aléatoirement pour chacun des critères, selon une distribution uniforme comprise entre 0,1 et 1 afin qu'aucun critère ne puisse être plus de 10 fois plus important qu'un autre. Les résultats obtenus avec 10 millions de simulation permettent d'avoir une vision d'ensemble des vainqueurs possibles par méthode de pondération. C2 arrive en tête dans 82% des simulations et C4 dans 17%. C1 arrive marginalement en tête dans 1% des simulations, les autres candidats ne sont quasiment jamais vainqueurs. Ceci implique que quels que soient les choix de poids des décideurs, il est très peu probable que d'autres candidats que C2 ou C4 soient vainqueurs par ce type de méthode. Il semble persister une influence structurelle dans la valuation des critères pour chaque site, indépendamment des poids des critères eux-mêmes.

La Table 2 résume ces résultats.

TABLE 2
Résultats de la méthode de pondération avec différents choix de poids.

Choix des poids	C1	C2	C3	C4	C5	C6
P_0	44,45	39,67	44,73	43,77	48,32	49,58
P_1	9,75	9,29	10,44	9,37	10,81	10,18
P_2	10,15	9,33	10,00	9,89	10,78	10,66
P_3	128	119	135	124	141	139
aléatoire	1,06%	81,7%	0,01%	17,2%	0%	0,00004%

Pour conclure, une connaissance des préférences réelles des décideurs aurait peut-être pu permettre de départager plus efficacement C2 et C4 par une telle méthode. Etant dans l'ignorance de ces préférences, nous avons exploré des possibilités de choix de poids. Une conclusion « robuste »¹ est alors de dire que C2 et C4 sont les meilleurs candidats selon ce type de méthode.

4.2. *Méthode Borda.* La méthode Borda consiste à considérer l'ordre dans lequel sont classés les sites candidats sur chacun des critères. En fonction du rang obtenu, on décerne un certain nombre de points à chaque candidat. La façon la plus classique de procéder est d'attribuer pour chaque critère un point au site arrivant premier, deux au second, ... et six au dernier. En cas d'égalité de plusieurs candidats pour un critère donné, les points sont partagés : par exemple si quatre sites arrivent deuxième ex-aequo, ils se partagent en quatre les points attribués aux places 2 à 5, soit $(2+3+4+5)/4 = 3,5$. Puis, pour chaque candidat, on fait la somme des points qu'il a obtenu sur l'ensemble des critères. Le candidat ayant le moins de points est le meilleur.

L'inconvénient de cette méthode est de ne pas utiliser les informations sur les écarts entre les candidats sur les différents critères. Par ailleurs, contrairement à la méthode de pondération, elle est sensible à la présence d'alternatives non pertinentes :

1. Sens courant du terme robuste : solide, peu ébranlable, laissant peu de doute quant à sa véracité.

la présence ou l'absence d'un candidat peut influencer sur le classement relatif final de deux autres candidats puisqu'elle peut modifier le nombre de points alloués sur un critère. Dans ce sens, elle manque de robustesse².

On doit souligner que cette méthode dans la version adoptée ici ne prend pas en compte l'importance relative (les poids) des différents critères. Si l'importance des critères aux yeux du décideur était réellement connue, cela serait certainement un défaut. Ici, c'est beaucoup moins clair.

On obtient ainsi les résultats présentés dans la Table 3. Le candidat C4 arrive en tête devant C2 puis C1. On note une cohérence avec les résultats obtenus par la méthode de pondération, même si pour cette dernière C2 arrivait en tête devant C4 la plupart du temps.

TABLE 3
Méthode Borda.

C1	C2	C3	C4	C5	C6
183	175	188	168,5	201,5	197

4.3. *Méthode Condorcet.* Tout comme la méthode Borda, la méthode Condorcet est une méthode ordinale et ne prend pas en compte les écarts de note ni les poids des critères. La similitude s'arrête là : dans cette méthode, on compare chaque paire possible de sites candidats en comptant le nombre de critères où l'un domine l'autre. On résume le tout sous forme du tableau synthétique Table 4. Par exemple, C2 est meilleur que C1 sur 19 critères et moins bon sur 13 critères (et équivalent sur les 21 critères restants).

Le tableau obtenu est ainsi plus riche d'information, dans la mesure où la matrice des duels permet la comparaison des candidats deux à deux. Cette méthode, à l'origine un système de vote plutôt qu'une méthode d'aide à la décision, est aussi qualifiée de « majoritaire » car basée sur le principe de Condorcet « s'il existe un candidat qui est majoritairement préféré à chacun des autres candidats, ce candidat doit être unique et c'est lui qu'il faut élire ».

TABLE 4
Résultats des duels dans la méthode Condorcet.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	X	13	18	15	26	21
C2	19	X	20	18	22	22
C3	16	17	X	12	19	17
C4	20	20	21	X	23	21
C5	17	15	15	14	X	13
C6	16	15	12	12	16	X

À partir du tableau des duels, on peut ordonner les couples de candidats, et en déduire logiquement l'ordre global. Du point de vue pratique, il est important de

2. Ici le terme robuste correspond à la capacité de la méthode à résister à la prise en compte de candidats supplémentaires.

TABLE 5
Indices de concordance pour la méthode Electre.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	X	0.577	0.674	0.631	0.665	0.700
C2	0.776	X	0.638	0.638	0.772	0.792
C3	0.699	0.617	X	0.709	0.754	0.849
C4	0.714	0.658	0.741	X	0.699	0.757
C5	0.541	0.590	0.614	0.566	X	0.771
C6	0.581	0.580	0.617	0.586	0.760	X

noter que le classement obtenu n'est pas forcément transitif, ce qui empêche parfois de dégager un vainqueur indiscutable.

On voit ici que le candidat C4 est meilleur que chacun de ses adversaires dans ce type de méthode. C2 bat tous le monde sauf C4. C1 domine tous les autres, sauf C4 et C2. La méthode Condorcet donne donc un classement final où C4 est le vainqueur. Il devance C2 puis C1. À nouveau, C4 et C2 semblent être des sites appropriés.

Encore plus que la méthode Borda, cette approche présente une propriété de robustesse³ intéressante. Une variation des notes sur certains critères, voire l'ajout ou la suppression de peu de critères modifie moins facilement le résultat obtenu. De plus, elle n'est pas sensible à la présence d'alternatives non pertinentes : ajouter ou retirer un candidat ne modifiera en rien le résultat du duel entre deux autres candidats. Enfin, elle est plus riche sémantiquement car l'ordre final obtenu se base sur une analyse comparative des ordres obtenus par couple de candidats.

4.4. *Méthode Electre.* Depuis sa première apparition, en 1965, la méthode Electre [5] a eu un large impact sur la communauté de recherche opérationnelle et a été largement utilisée pour l'aide à la décision dans tout type de domaines [6]. Il s'agit comme pour la méthode Condorcet d'une méthode de comparaison par paires de candidats. Cependant, une différence avec les deux méthodes précédentes est qu'on prend en compte les poids des critères.

Cette méthode repose sur la notion de surclassement. Un candidat surclasse un autre si deux conditions sont remplies :

- (1) il est meilleur sur un nombre important de critères,
- (2) il n'est pas trop fortement dominé sur les autres.

Pour évaluer la première condition, on calcule un indice appelé *indice de concordance* : le principe est de comparer chaque paire de candidats en comptabilisant la somme des poids des critères pour lesquels un candidat est supérieur ou égal à un autre. Ainsi, C2 est meilleur ou égal à C1 sur 77,6% des critères pris en compte avec leur poids, ce qui donne un indice de concordance de 0,776. Pour ne pas alourdir trop la présentation, nous retenons ici uniquement le choix de poids P_0 . Les indices de concordance sont donnés dans la Table 5.

3. Ici le terme robuste correspond à la capacité de résister à des variations non significatives des données du problème.

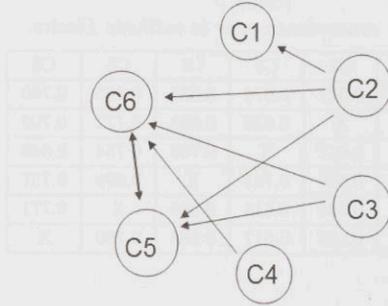


FIGURE 4. Graphe de surclassement avec $s_c=0.75$

On peut déjà observer qu'on peut utiliser cette table pour effectuer une méthode Condorcet pondérée : on prend en compte la somme des poids des critères pour lesquels un candidat bat un autre au lieu du nombre de critères. Dans ce cas, les résultats sont quasiment les mêmes que pour la méthode Condorcet : C4 arrive devant C2 puis C3 arrive en troisième position au lieu de C1.

La condition (1) est considérée comme remplie si l'indice de concordance de la paire (i,j) dépasse une certaine valeur nommée *seuil de concordance*, noté s_c (s_c est compris entre 0,5 et 1). Selon la volonté du décideur, on utilisera une valeur de s_c plus ou moins grande.

La seconde condition est évaluée par des indices dits de *discordance* ou par un *système de veto*. Ce système évalue pour chaque critère un écart maximal acceptable au-delà duquel on considère que le surclassement n'est pas possible. Cependant, la prise en compte habituelle de la discordance par Electre n'est pas très opportune dans le cas présent où l'on a 53 critères notés de 1 à 4. Tout d'abord parce que sur 53 critères, on en trouvera toujours un qui s'oppose au surclassement. Ensuite parce que l'écart maximal réalisable sur un critère est de 3, et que même pour un critère seul, le veto est trop facilement appliqué. Nous ne tiendrons donc pas compte de cette deuxième condition par la suite.

On construit ensuite un graphe de surclassement où chaque flèche d'un candidat A vers un candidat B signifie que A surclasse B . Pour donner un exemple du fonctionnement de cette méthode, prenons $s_c = 0.75$. On obtient alors le graphe de surclassement représenté en Figure 4.

La méthode Electre extrait alors ce qui est appelé *noyau* et représente les meilleurs candidats. Le noyau doit présenter les propriétés suivantes :

- les éléments du noyau ne se surclassent pas entre eux,
- les éléments extérieurs au noyau sont surclassés par un élément du noyau.

Ainsi, dans l'exemple de la Figure 4, le noyau est composé de C2, C3 et C4, qui représentent donc les meilleurs candidats au regard de la méthode. On notera $N=\{C2,C3,C4\}$.

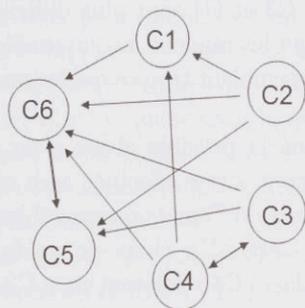


FIGURE 5. Graphe de surclassement avec $s_c=0.7$

Le choix des paramètres de la méthode peut avoir une influence capitale sur les relations de surclassement et par conséquent sur la constitution du noyau. Dans le cas présent, le seul paramètre est le seuil de concordance. Le choix de sa valeur étant pour une large part arbitraire, le faire varier permettra d'envisager des cas différents et d'obtenir des solutions robustes⁴. Ce type d'approche est généralement nommé « analyse de sensibilité ». Cette information duale offre l'opportunité de montrer aux décideurs l'impact de la valeur fixée du seuil de concordance sur la stabilité de la décision prise.

Par exemple, si notre graphe est enrichi en diminuant s_c à 0,7, ce qui mécaniquement augmente le nombre de relations de surclassement, on obtient le graphe de la Figure 5. Ici deux noyaux sont possibles : $N=\{C2,C3\}$ ou $N=\{C2,C4\}$. C3 et C4 ne peuvent être en même temps dans le noyau. On note au passage qu'il peut arriver que le noyau ne soit pas unique.

En faisant varier s_c entre 0,6 et 0,75, on constate que C2, C3 ou C4 sont toujours dans un des noyaux, excepté pour s_c compris entre 0,71 et 0,74 : dans ce cas, le noyau est constitué uniquement de C2 et C4. Ces deux solutions sont donc les plus robustes au regard de la méthode Electre, puisqu'elles se retrouvent toujours dans le noyau mais C3 semble également un candidat respectable qui apparaît très souvent dans le noyau.

Le fait que C3 apparaisse souvent dans le noyau contrairement à C1 peut sembler étonnant au vu du résultat des méthodes précédentes. Cependant, si l'on consulte le tableau de concordance, on s'aperçoit que C1 est battu par C2 par 78% des critères pondérés (en fait C2 est meilleur ou égal à C1 pour 40 critères sur 53), ce qui écarte toujours C1 du noyau. On aperçoit ici un des avantages de la méthode Electre : à partir du moment où le candidat C2 est dans le noyau, il est considéré comme satisfaisant, et tous les candidats qu'il surclasse sont donc écartés car ils sont moins bons sur une forte majorité de critères. Autrement dit, C1 n'est peut-être pas plus mauvais que C3 ou C4, mais il est clairement plus mauvais que C2 et peut donc

4. Ici le terme robuste décrit la capacité de résister à des variations des paramètres de la méthode.

être écarté. En revanche, C2, C3 et C4 sont plus difficiles à départager, soit qu'ils aient des qualités différentes qui les rendent incomparables (C2 comparé à C3 et C2 comparé à C4) soit qu'ils se ressemblent trop ce qui les rend indifférents (C3 comparé à C4).

Bien entendu, ayant critiqué la possible absence de choix réel de poids par le décideur, cette méthode gagnerait à être effectuée avec un tel choix s'il existe. Nous avons préféré ne pas multiplier les différents cas possibles dans cette dernière partie dans le but de garder de la clarté. Un choix de poids logique comme P_2 aurait probablement un peu mieux classé C4 relativement à C2.

5. Conclusion. L'étude initiale effectuée par le prestataire mandaté par la collectivité a le mérite de noter 6 candidats selon 53 critères et d'effectuer ainsi un travail très complet d'évaluation des différents candidats. Néanmoins, on peut regretter le manque de hiérarchisation affirmée par le décideur de l'importance des critères, thèmes et catégories. Cela se traduit par un poids de 1 affecté à tous les thèmes, qui se veut (peut-être ?) neutre mais est tout aussi arbitraire qu'un autre. En effet, cela a pour conséquence l'influence bien supérieure de certaines catégories de thèmes par rapport à d'autres, sans qu'on ait l'impression que ce choix soit voulu. On regrette aussi le fait que l'étude n'ait pas eu recours à une méthode perfectionnée d'aide à la décision, au lieu de la méthode de pondération, trop simplificatrice. Tout ceci est problématique car le résultat obtenu par cette étude est évidemment profondément lié à ces choix. Ce résultat est que C2 arrive nettement en tête devant un peloton formé de C4, C1 et C3. Les candidats C5 et C6 sont discrédités.

Cependant ces résultats sont trompeurs. Soulignons qu'il est parfois illusoire dans des problèmes aussi complexes de vouloir détacher un vainqueur indiscutable : la multiplicité des méthodes existantes peut donner des vainqueurs différents, et même le vainqueur obtenu par une méthode peut être sensible à de faibles variations des paramètres du problème, voire à un changement de paramètre interne à la méthode ! Une aide à la décision honnête préférera donc éliminer des candidats non crédibles et sélectionner plusieurs candidats potentiellement intéressants en soulignant leurs points forts et leurs points faibles. Elle le fera en vérifiant avant tout la robustesse du résultat par rapport aux choix de la méthode et des divers paramètres.

Dans cette optique, nous avons renforcé l'étude initiale en conjuguant l'utilisation d'autres valeurs de pondérations des critères (tout aussi arbitraires) et d'autres méthodes d'aide à la décision. Nous pouvons ainsi parvenir à tirer quelques conclusions. La première de ces conclusions est que les candidats C2 et C4 semblent se détacher. En l'absence de connaissance supplémentaire sur l'importance des différents critères, un choix (quel qu'il soit) entre ces deux candidats semble être un choix principalement politique. En effet, au vu des résultats obtenus, il semble difficile de privilégier l'un à l'autre. Visiblement, ils n'ont pas les mêmes arguments. Pour être plus précis, ces deux candidats ont des points forts communs qui sont l'acceptabilité technique et économique. En revanche, l'environnement socio-économique privilégie le choix de C2 tandis que la prise en compte de l'environnement naturel ferait pencher pour C4.

Par ailleurs, il y a plus de critères pour lesquels C4 est meilleur que C2 que l'inverse. Cela est relativisé par le fait que pour ces critères, l'écart entre les deux candidats est en moyenne plus faible que sur les critères où C2 est meilleur que C4.

Les candidats C5 et C6 arrivent en queue dans la quasi-totalité des méthodes. Ils semblent pouvoir être exclus. Les candidats C1 et C3 arrivent au milieu du peloton. Cependant, ainsi que le détecte la méthode Electre, C3 semble un peu meilleur et pourrait même faire un candidat acceptable, C1 étant éliminé par comparaison directe avec C2, qu'il ne bat que sur très peu de critères.

Une autre conclusion concerne l'ensemble du processus de cette étude. Nous ne connaissons pas en détails les tenants et les aboutissants de ce projet, notamment sous ses aspects politiques. Toutefois, nous pouvons fournir quelques éléments de savoir-faire. Nous avons constaté l'importance de la grille quantitative des (groupes) de critères (poids des groupes, valeurs possibles de critères) qui pèse énormément dans l'orientation de la décision finale. Tout le processus d'une aide à la décision instruite et collaborative doit être réalisé en concertation avec l'ensemble des partenaires impliqués (décideurs et représentants des sites). Dans ce processus, on peut citer :

- une explicitation des objectifs de l'analyse : que cherche-t-on à obtenir in fine ? Quelle est la propriété souhaitée du site qui justifierait la constitution de telle ou telle grille d'évaluation ?
- une mise en cohérence des critères, leur quantification (grille d'affectation) devant être co-construite par les protagonistes et en phase avec l'objectif visé.
- idéalement, une séparation fonctionnelle entre l'organisme réalisant la grille d'évaluation en concertation et celui qui la remplira pour établir le diagnostic.
- une recherche et une comparaison des méthodes alternatives, de nature à mieux éclairer les solutions possibles compte tenu des choix méthodologiques, pour l'obtention d'une décision « en connaissance de cause ».
- une communication délicate et argumentée permettant de réduire les effets néfastes des oppositions locales, se basant parfois sur des effets « Not In My Back Yard ».

Enfin, la troisième conclusion porte sur la robustesse, qualité essentielle en aide à la décision [7]. Cette propriété peut porter sur l'ensemble du processus de décision. Si, à l'issue de la concertation, une convergence apparaît entre les protagonistes du projet suite à une connaissance transparente, explicite et réciproque des enjeux et des contraintes, le processus a été et restera robuste, puisque la décision a grande chance de rester pérenne, car son impact a été appréhendé sur le long terme. Sur le plan des méthodes employées, nous pouvons, avec les arguments présentés dans cet article, affirmer qu'une méthode perfectionnée comme Electre, surtout si elle est couplée avec une analyse de sensibilité, procure beaucoup plus de robustesse que les autres. En effet, elle donnera d'emblée un ensemble de candidats satisfaisants plutôt que d'en sélectionner un seul qui serait trop tributaire de divers paramètres. Cela renvoie alors, en boucle, à la robustesse de l'ensemble du processus de décision, niveau

prégnant dans le succès d'une aide à la décision collective, objective et fructueuse.

ANNEXE A: DONNÉES

TABLE 6
Critères, poids et notes.

Catégories	Thèmes	Critères	Poids	C1	C2	C3	C4	C5	C6	
Acceptabilité technique	Géologie	Nature du substratum	0.33	2	2	2	3	3	3	
		Nature des terrains	0.33	2	2	1	1	1	1	
		Fissures - Fractures	0.33	3	2	3	1	1	1	
	Hydrogéologie	Aquifère supérieur	0.33	3	3	2	2	2	3	
		Aquifère souterrain	0.33	3	2	3	4	2	4	
		Eau potable	0.33	1	2	1	2	2	1	
	Eaux superficielles	Sensibilité milieu aval	0.33	2	1	2	1	4	3	
		Gestion des eaux	0.33	3	3	1	3	4	2	
		Bassin versant	0.33	2	1	1	2	1	1	
	Accès	Qualité desserte	0.20	1	4	1	1	3	2	
		Conditions d'accès	0.20	1	3	2	1	3	4	
		Entrée du site	0.20	2	1	2	2	4	2	
		Viabilité hivernale	0.20	2	3	3	1	1	2	
		Transport ferroviaire	0.20	4	4	4	3	4	4	
	Distance et trafic	Distance et durée	0.50	3	3	2	2	3	3	
		Flux PL	0.50	1	2	1	1	1	3	
	Morphologie	Pente	0.33	1	2	1	4	3	4	
		Exposition vents	0.33	3	1	4	4	4	4	
		Capacité potentielle	0.33	1	1	2	1	3	2	
	Foncier	Nombre propriétaires	0.50	4	1	3	1	2	4	
Nombre Indivision		0.50	2	1	4	1	4	4		
Environnement naturel	Paysage	Contexte paysager	0.20	3	4	2	2	4	2	
		Règlements, classement	0.20	2	3	3	2	4	3	
		Sensibilité paysagère	0.20	3	3	3	1	4	2	
		Perception	0.20	2	2	4	3	3	2	
		Capacité d'intégration	0.20	1	3	3	2	2	2	
	Milieux naturels	Milieux naturels	0.33	4	2	2	2	1	2	
		Habitats naturels	0.33	3	3	1	3	2	2	
		Dynamique écologique	0.33	3	3	2	3	2	2	
Environnement socio-économique	Agriculture	Zones AOC	0.17	1	1	4	3	4	4	
		Autres labels	0.17	4	2	4	3	4	4	
		Aménagements pérennes	0.17	4	4	2	2	2	1	
		Usages agricoles	0.17	3	3	3	2	4	4	
		Structure foncière	0.17	2	4	3	2	3	2	
		Niveau d'impact	0.17	4	2	2	1	1	1	
	Habitat	Situation habitations	0.50	4	4	4	4	4	4	
		Nombre habitations	0.50	4	2	4	4	3	4	
	Urbanisme	Compatibilité POS/PLU	0.33	1	1	4	4	4	4	
		Evolution démographique	0.33	4	1	4	4	1	1	
		Servitudes	0.33	1	1	4	4	1	4	
	Tourisme	Sites réglementés	0.25	1	2	3	2	2	3	
		Patrimoine	0.25	3	3	3	3	4	4	
		Accueil	0.25	2	1	1	2	1	1	
		Loisirs	0.25	3	3	2	3	2	3	
	Industrie Commerce Artisanat	Environnement	0.50	3	2	2	2	3	2	
		Impact	0.50	1	1	1	4	1	1	
	Economie	Aménagement accès	Réseau routier	1.00	2	4	2	2	4	4
		Achat terrain	Valeur foncière	1.00	2	1	3	4	3	3
		Investissements projet	Coût aménagements	0.25	3	1	4	2	4	3
Insertion paysagère			0.25	2	4	4	3	3	2	
Modification réseaux			0.25	1	1	2	2	1	2	
Raccordement			0.25	2	1	3	1	2	1	
Coût transport		Coût transport	1.00	4	3	2	2	3	3	

REMERCIEMENTS

Nous remercions les partenaires de ce projet : la COPLER, pour les informations transmises, ainsi que l'ANR pour le soutien financier apporté.

RÉFÉRENCES

- [1] ROY, B. (1985). *Méthodologie Multicritère d'Aide à la Décision*. Economica.
- [2] SHAN, Y. (2005). *Location Transport and Land-Use : Modelling Spatial-Temporal Information*. Springer.
- [3] DREZNER Z. and HAMACHER H.W. (2004). *Facility locations : Application and theories*. Springer.
- [4] SOULAGE, D. (2010). Rapport d'information fait au nom de la mission commune d'information sur le traitement des déchets. <http://www.senat.fr/rap/r09-571/r09-5711.pdf>.
- [5] ROY, B. (1968). Classement et choix en présence de points de vue multiples (la méthode ELECTRE). *la Revue d'Informatique et de Recherche Opérationnelle (RIRO)* 8 57-75.
- [6] FIGUEIRA, J., GRECO, S. and EHRGOTT, M. (2005). *Multiple Criteria Decision Analysis : State of the Art Surveys*. Springer Verlag, Boston, Dordrecht, London.
- [7] ROY, B. (2009). Pour mieux répondre à la préoccupation de robustesse en aide à la décision : Quatre propositions suite à un double constat. *Cahier Du Lamsade* 286.

§ LABORATOIRE D'ANALYSE NON LINÉAIRE ET GÉOMÉTRIE, EA2151,
UNIVERSITÉ D'AVIGNON ET DES PAYS DE VAUCLUSE, 33 RUE LOUIS PASTEUR, 84000 AVIGNON (FRANCE)
E-MAIL: daniel.gourion@univ-avignon.fr

¶ U.M.R. ESPACE 6012, UNIVERSITÉ D'AVIGNON ET DES PAYS DE VAUCLUSE
74 RUE LOUIS PASTEUR, 84029 AVIGNON (FRANCE)
E-MAIL: didier.josselin@univ-avignon.fr