Université de Sherbrooke
31156008115753

Département de géographie et télédétection
Faculté des lettres et sciences humaines
Université de Sherbrooke

QL
737
U55
V35
1999
G
Thèse

Identification des zones d'habitat d'hiver du Cerf de Virginie à l'aide d'un système d'information géographique.

BIBLIOTHÈQUE U.S.

par
Martin Valcourt, 1963-

I-1718

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de Maître ès science (M. Sc.) en géographie

Septembre 1999

À Nicole, à Julien
et à l'avenir.

Auteur : Martin Valcourt
Titre : Identification des zones d'habitats d'hiver du Cerf de Virginie à l'aide d'un système d'information géographique.
Type de document : Mémoire de maîtrise
Institution : Université de Sherbrooke
Nombre de pages :

Résumé :

La conservation de l'habitat d'hiver du Cerf de Virginie est primordiale pour assurer la survie de l'espèce au Québec, limite Nord de sa distribution. La méthode traditionnelle d'inventaire des différents habitats fauniques par photo-interprétation et analyse de cartes forestières est jugée lente et peu adéquate pour assurer le suivi sur un grand territoire. L'utilisation des systèmes d'information géographique a été étudiée afin de palier à ces défauts. Les résultats obtenus sont intéressants et laissent entrevoir les possibilités d'un tel système pour la surveillance de l'habitat d'hiver du Cerf. Le territoire à l'étude est le ravage de Duchénier. L'objectif de la présente recherche est de développer une méthode simple qui permet l'identification et la cartographie des habitats d'hiver potentiels pour le cerf. L'utilisation de la théorie de la logique floue est susceptible de rendre le système plus souple par rapport à la théorie booléenne généralement utilisée. Des grilles interprétatives et des fonctions d'appartenance floue ont été élaborées à partir des variables discriminantes de l'habitat d'hiver. Ensuite, les cartes écoforestières et les courbes de niveau du territoire à l'étude ont été numérisées et intégrées au système d'information géographique. L'interrogation du SIG à l'aide de ces éléments a permis la réalisation d'une carte représentant l'occupation du sol ainsi qu'une carte booléenne et une carte floue des caractéristiques géographiques du territoire. La superposition de ces cartes à partir des couverts d'abri, a permis de délimiter une zone favorable comme habitat d'hiver pour le cerf. Le territoire identifié par la méthode booléenne (63,9% du ravage) est de superficie inférieure à celui identifié par la logique floue (70,7%).

Table des matières

Table des matières i
Liste des figures iii
Liste des tableaux iv
Liste des annexe v
Remerciements vi

1. Introduction 1

2. Revue de littérature 3

3. Problématique 7

4. Hypothèses scientifiques 8
   4.1. Hypothèse principale 8
   4.2. Hypothèse spécifique 8

5. Objectifs poursuivis 8
   5.1. Objectif principal 8
   5.2. Objectifs spécifiques 8

6. Méthodologie 9
   6.1. Site d'étude 9
   6.2. Acquisition des données 9
      6.2.1. Sélection des variables discriminantes 9
      6.2.2. Élaboration des grilles interprétatives 17
      6.2.3. Définition des fonctions d'appartenance floue 19
      6.2.4. Numérisation des cartes écoforestières 20
      6.2.5. Numérisation des courbes de niveau 20
      6.2.6. Numérisation des limites du ravage de Duchénier 21
      6.2.7. Création de la base de données 21
      6.2.8. Enregistrement des données 21
   6.3. Traitement des données 22
      6.3.1. Création de l'image représentant l'occupation du sol et la biogéographie 22
      6.3.2. Création de l'image booléenne pour l'altitude 22
      6.3.3. Création de l'image booléenne pour la distance à la rivière 23
      6.3.4. Image booléenne représentant les caractéristiques climatiques 23
      6.3.5. Cartographie de l'habitat d'hiver du Cerf de Virginie : Booléen 23
      6.3.6. Création de l'image floue pour l'altitude 24
      6.3.7. Création de l'image floue pour la distance à la rivière 24
      6.3.8. Image floue représentant les caractéristiques climatiques 24
      6.3.9. Cartographie de l'habitat d'hiver du Cerf de Virginie : Floue 25
      6.3.10. Calcul de l'indice de présence humaine 26

7. Résultats 27
7.1. Carte d'occupation du sol et de la biogéographie de la zone à l'étude 27
7.2. Carte de la classification booléenne des caractéristiques climatiques 29
7.3. Cartographie de l'habitat d'hiver du Cerf de Virginie : Booléen 29
7.4. Carte de la classification floue des caractéristiques climatiques 32
7.5. Cartographie de l'habitat d'hiver du Cerf de Virginie : Floue 32

8. Interprétation des résultats et discussion 35

9. Conclusion 39

10. Références 40

Liste des figures

Figure 1 : Organigramme méthodologique 10
Figure 2 : Localisation du ravage de Duchénier 11
Figure 3 : Présentation des variables discriminantes 12
Figure 4 : Fonction d'appartenance floue pour l'altitude minimale 19
Figure 5 : Fonction d'appartenance floue pour la distance à la rivière 20
Figure 6 : Carte d'occupation du sol et de la biogéographie de la zone à l'étude 28
Figure 7 : Classification booléenne des caractéristiques climatiques 30
Figure 8 : Cartographie de l'habitat d'hiver du Cerf de Virginie : Booléen 31
Figure 9 : Classification floue des caractéristiques climatiques 33
Figure 10 : Cartographie de l'habitat d'hiver du Cerf de Virginie : Floue 34
Figure 11 : Aire d'occupation du Cerf de Virginie dans le ravage de Duchénier 36

Liste des tableaux

Tableau 1 : Classes de densité des peuplements forestiers 13
Tableau 2 : Classes de hauteur des peuplements forestiers 13
Tableau 3 : Les couverts d'abri 15
Tableau 4 : Les couverts d'abri/nourriture 15
Tableau 5 : Les couverts de nourriture 15
Tableau 6 : Grille interprétative pour l'altitude 18
Tableau 7 : Grille interprétative pour la distance à la rivière 18
Tableau 8 : Composition du territoire 27
Tableau 9 : Composition du ravage identifié : théorie booléenne 29
Tableau 10 : Composition du ravage identifié : théorie floue 32

Liste des annexes

Annexe 1 : Le cerf de Virginie 43
Annexe 2 : La logique floue..... 49

1. Introduction

La conservation de l'habitat d'hiver du Cerf de Virginie est primordiale pour assurer la survie de l'espèce au Québec, limite Nord de sa distribution. La méthode traditionnelle d'inventaire des différents habitats fauniques par photo-interprétation et analyse de cartes forestières est jugée lente et peu efficace pour assurer le suivi sur un grand territoire. Depuis quelques années, la recherche s'intéresse à l'utilisation de systèmes d'information géographie (SIG) dans l'observation des territoires. Des études ont permis de déterminer à l'aide d'un SIG le degré d'aptitude de territoires à recevoir certaines populations animales : le loup et le kangourou (Mladanoff et Skikley, 1998; Skidmore et Wlaker, 1996). Les résultats obtenus sont prometteurs et laissent entrevoir les avantages de l'application d'un tel système pour l'identification de l'habitat d'hiver (ravage) du Cerf de Virginie.

Il est à remarquer en outre que l'utilisation de la théorie des ensembles floues à l'intérieur des SIG, bien que courante pour l'étude des sols, a très peu été rapportée dans les écrits sur les milieux fauniques. L'avantage attendue du concept d'appartenance variable est une définition plus raffinée des limites territoriales puisqu'il permet le traitement organisé et rationnel d'informations plus ou moins approximatives (Daunich *et al.* 1996; Davidson *et al.* 1994; Burrough 1992). Or, certaines variables qui permettent de définir un ravage sont de cette nature : altitude idéale du territoire par rapport au niveau de la mer, distance idéale d'un point d'eau, etc. L'hypothèse de la présente étude stipule donc qu'il est possible d'identifier les zones potentielles d'habitat d'hiver du Cerf de Virginie à l'aide d'un système d'information géographique intégrant la théorie des ensembles flous.

L'objectif est le développement d'un système à interroger à l'aide de grilles interprétatives composées des variables discriminantes définissant un ravage. La simplicité d'utilisation et l'accessibilité du système sont des critères de base. Le résultat escompté est la délimitation de la zone de ravage pour la région écologique 5A et pourra être comparé à la zone connue. L'utilisation des couverts d'abri servira de base à la définition des limites du ravage. L'exploitation du système est ainsi maximale et confère

à la présente étude un caractère original. En effet, jusqu'ici, les études sur l'habitat du Cerf ont réussi à produire des cartes de la variation du degré de potentiel d'un territoire sans toutefois définir une zone précise.

2. Revue de littérature

Traditionnellement, les biologistes utilisaient les cartes forestières et les photos aériennes afin d'analyser les différentes données d'un territoire. Aujourd'hui, cette méthode est jugée peu efficace pour assurer l'analyse des changements sur de grands territoires. Depuis quelques années, les systèmes d'information géographique (SIG) sont utilisés comme moyen pour coder, emmagasiner et retrouver des données sur l'aspect de la terre. Ces données, d'accès facile et géographiquement référées, sont manipulées de façon interactive dans un ensemble de systèmes pouvant servir à l'étude des processus environnementaux (Burrough, 1992). En biologie, l'utilisation des SIG permet entre autres l'analyse des changements sur un grand territoire par modélisation spatiale (Congalton *et al.*, 1993).

De nombreuses études font intervenir les SIG dans l'observation des habitats fauniques et de la faune en général. Butler *et al.* (1995) utilisent le SIG afin de cartographier les endroits de nidification à partir des données de positionnement fournies par GPS. Ces études permettent de déterminer les variables physiques et biotiques qui caractérisent l'habitat de l'espèce étudiée. Nevo et Garcia (1996) ainsi que Rushton *et al.* (1997) visent à développer des modèles mathématiques qui permettent soit de prescrire les actions nécessaires à entreprendre au niveau de la gestion des couverts forestiers pour satisfaire l'objectif de densité d'une population animale ou encore d'étudier la dynamique qui existe entre deux espèces afin de déterminer si l'augmentation de l'une affecte la population de l'autre.

On a aussi utilisé un modèle mathématique qui, à partir des variables physiques, biotiques et climatiques favorables à une espèce, détermine les différents niveaux de potentiel d'un territoire à recevoir une population de loups (Mladanoff et Sickley, 1998) ou de kangourous (Skidmore et Walker, 1996). Ces études démontrent qu'il est possible de définir de tels modèles et d'obtenir des résultats intéressants. En effet, Mladanoff et Sickley (1998) obtiennent un résultat de 78% lorsque comparé à une zone déjà existante et parviennent à délimiter une zone potentielle de 47 372 km² dans le Maine où le loup pourrait être introduit. Skidmore et Walker (1996) obtiennent des résultats supérieurs à 86% lorsqu'ils les comparent à une zone réelle favorable au kangourou. Par ailleurs, Foster *et al* (1997) ont étudié l'influence de l'organisation du territoire et de la présence

humaine sur la mortalité du Cerf de Virginie lors de la saison de chasse. Buroski *et al.* (1996) ont étudié le cerf en hiver afin de cartographier le déplacement et d'étudier les variables physiques et biotiques qui caractérisent les zones hivernales. Aspinal (1992) et Congalton *et al.* (1993) de leur côté utilisent les caractéristiques physiques et biotiques qui définissent les secteurs d'hiver du Cerf afin de créer un modèle mathématique qui permet de prédire l'opportunité d'un territoire à recevoir ou non une population de cerf durant l'hiver. On parle alors d'une carte de potentialité. Les résultats obtenus démontrent la validité des modèles. Ainsi, Aspinal (1992) après vérification sur le terrain arrive avec une précision moyenne de 80 ± 0,5%.

Depuis quelques années, de nouvelles avenues se sont développées au niveau des SIG. On parle entre autres des systèmes experts qui sont des programmes utilisant des connaissances pour simuler le comportement d'un scientifique (Maggio, 1987). Le système expert constitue donc à la fois un outil de mise en œuvre et de transmission du savoir grâce à sa base de connaissance qui contient l'expertise des experts, le modèle mathématique de simulation et la base de données (Maggio, 1987). Lorsqu'un système expert est associé à un système d'information géographique, ce dernier remplace la banque de données. Cela permet de donner une dimension spatiale et topologique aux données. Il fonctionne selon des règles :

SI prémisse *ALORS* conclusion.

Au début des systèmes experts, ces règles s'appliquaient suivant la théorie classique des ensembles mais aujourd'hui, on cherche à introduire la théorie des ensembles flous à ces règles (Davidson *et al.* 1994; Hall *et al.*1992).

Il y a plus de 25 ans que le professeur Lofti A. Zadeh de l'Université de Californie a introduit la notion de sous-ensembles floues (annexe 2) à partir de l'idée d'appartenance partielle à une classe aux limites mal définies. Graduellement la logique floue s'est introduite dans la plupart des domaines dont celui des systèmes d'information géographique et des systèmes experts.

Selon la théorie classique des ensembles un élément appartient à une classe ou n'y appartient pas. Ce qui signifie qu'un sous-ensemble classique A de X est défini par une fonction caractéristique χ_A qui prend la valeur 1 pour les éléments de X qui appartiennent à A et la valeur 0 pour ceux qui n'appartiennent pas à A (Bouchon-Meunier, 1994).

$$\chi_A: X \rightarrow \{0,1\} \tag{2.1}$$

Cette définition ne laisse donc aucune place à l'ambiguïté ou à l'imprécision.

Contrairement aux ensembles classiques, le degré d'appartenance à un ensemble flou permet de définir une gradation dans l'appartenance d'un élément à cet ensemble. Ce concept d'appartenance variable rend possible la représentation et la manipulation d'une information imprécise et vague (Dubois et Prade, 1980).

Un sous-ensemble flou A de X est donc défini par une fonction d'appartenance qui associe à chaque élément x de X, le degré $f_A(x)$ compris entre 0 et 1 avec lequel x appartient à A (Bouchon- Meunier, 1994).

$$f_A: X \rightarrow [0,1] \tag{2.2}$$

Tout comme pour les ensembles classiques, différentes opérations mathématiques s'appliquent aux ensembles flous. En fait, les opérations mathématiques entre les ensembles flous sont essentiellement des généralisations des opérations entre des ensembles classiques (Jerabek, 1994). C'est pourquoi les notions d'union, d'intersection, d'inclusion et de complément de sous-ensembles flous sont utilisées.

C'est afin de permettre aux systèmes experts de travailler dans l'imprécis et le vague qu'on a intégré à ces derniers la théorie des ensembles flous. Un système flou est donc un système expert auquel on a incorporé la théorie des ensembles flous dans le processus de

raisonnement afin de combler la rigidité des règles utilisées dans le système (Kandel, 1991). L'utilisation d'un système expert flou couplé à un SIG est un domaine de recherche en pleine évolution. Ces recherches portent entre autres sur les outils de travail tel l'algorithme, afin de rendre plus performant les modèles numériques d'altitude et sur différents domaines d'application possibles.

Ces différents domaines concernent la localisation des services publics à l'intérieur des villes (Banai, 1993), la classification des sols au niveau de l'agriculture et de la foresterie Hall, 1992; Lowell, 1994) ainsi que la capacité de drainage des sols (Kollias, 1991). Quelques études parlent aussi de l'utilisation de système flou pour la gestion de la faune. Ainsi, Daunicht *et al.* (1996) utilise la logique floue afin de déterminer les zones favorables à la nidification de l'alouette (*Alauda arvensis*). Ces études démontrent que l'utilisation de la logique floue associée à un système d'information géographique facilite la prise de décision en étant plus efficace et précise que la théorie classique. On peut donc supposer que l'application de la théorie des ensembles flous à l'intérieur des SIG ira en augmentant dans les années à venir.

3. Problématique

Au Québec, le Cerf de Virginie (*Odocoilus virginianus*) occupe sa limite Nord de distribution. Son habitat d'hiver, communément appelé ravage, est un territoire d'au moins 250 hectares qui représente un site favorable en terme de microclimat et de conditions forestières (Germain et Potvin, 1990) (annexe 1). La préservation et le suivi de l'évolution de ces territoires est de première importance pour la survie du Cerf de Virginie au Québec (Germain *et al.* 1991). Suivant une période de déclin, l'augmentation actuelle de la population dans certaines régions amène également à s'intéresser aux zones potentielles d'habitat d'hiver en vue de les préserver. Toutefois, les différents gestionnaires de la forêt s'attardent généralement peu à l'identification des habitats potentiels, étape préalable à leur préservation. La méthode traditionnelle d'inventaire permettant l'identification des différents habitats fauniques est jugée inadéquate pour assurer un suivi rapide et efficace des changements des habitats sur de grands territoires (Congalton *et al.* 1993; Sirois, 1986). Cette méthode est l'interprétation de photos aériennes conjointement à l'analyse de cartes forestières.

La télédétection et les systèmes d'information géographique (SIG) ont été étudiés comme méthodes alternatives de localisation pour certaines espèces animales. Le SIG permet une manipulation aisée et un traitement rapide de l'information. Congalton *et al.* (1993) et Sirois (1986) ont utilisé le SIG et la télédétection afin de prédire l'opportunité d'un territoire à recevoir une population de cerfs durant l'hiver. La télédétection a été utilisée afin de classifier l'occupation du sol. Certaines caractéristiques biogéographiques de l'habitat d'hiver du Cerf n'ont toutefois pu être considérées. Mladenoff et Sickley (1998), Skidmore *et al.* (1996) et Austin *et al.* (1996) ont associé différents modèles mathématiques à un système d'information géographique afin de déterminer, à partir des variables physiques et biotiques, les différents niveaux de potentiel d'un territoire à servir d'habitat faunique. Les taux de réussite obtenus, plus de 80%, laissent entrevoir les possibilités d'utilisation d'un tel système pour le Cerf de Virginie.

4. Hypothèses scientifiques

4.1. Hypothèse principale

Il est possible d'identifier les zones potentielles d'habitat d'hiver du Cerf de Virginie en utilisant un système d'information géographique interrogé à l'aide des grilles interprétatives définissant les caractéristiques géographiques .

4.2. Hypothèse spécifique

L'utilisation de la théorie des sous-ensembles flous rendra le système plus souple par rapport à l'approche booléenne généralement utilisée.

5. Objectifs poursuivis

5.1. Objectif principal

Développer et mettre à l'essai une méthode simple et efficace qui permet l'identification et la cartographie des habitats d'hiver potentiels pour le Cerf de Virginie de la région du Bas-Saint-Laurent-Gaspésie.

5.2. Objectifs spécifiques

- Intégrer une base de données écoforestières significatives et les cartes numérisées correspondantes dans le système d'information géographique.
- Développer des grilles interprétatives suivant les caractéristiques propres à l'habitat d'hiver du Cerf de Virginie.
- Produire une carte thématique du territoire à l'étude.
- Introduire la notion de logique floue dans l'opération du système

6. Méthodologie

L'organigramme méthodologique présente les étapes méthodologiques suivies dans le cadre de cette étude (figure 1).

6.1. Site d'étude

Le site d'étude choisi englobe le ravage de Duchénier et pour fin de comparaison, son pourtour limitrophe. Il est situé dans la région administrative 01, à 35 kilomètres au sud de la ville de Rimouski. Sa superficie est de 10 040 hectares (figure 2). Le ravage chevauche deux régions écologiques : la région 5A, Basses et moyennes Appalaches (86%) et la région 5C, Lac Matapédia-Gaspésie (14%). Ce territoire forestier est composé en grande partie de résineux (80% de la superficie forestière totale) où le sapin (*Abies balsama*), l'épinette noire (*Picea mariana*) et le thuya (*Thuya occidentalis*) constituent l'essentiel des peuplements. Sa régénération se compose principalement de sapin et de thuya ce qui suggère que ces essences forment des associations stables à l'intérieur du ravage (Larocque, 1993)

Le relief se caractérise par des alignements de crêtes rocheuses parallèles orientées sud-ouest nord-est. L'altitude moyenne y est de 270 mètres et l'amplitude altitudinale moyenne de 90 mètres. On y observe aussi des pentes moyennes variant de 10% à 14%. Le territoire est traversé par de nombreux cours d'eau dont les plus importants sont la rivière Rimouski et la Petite rivière Touladi. L'accumulation de neige au sol est supérieure à 50 cm 100 jours par année (Larocque, 1993).

6.2. Acquisition des données

6.2.1. Sélection des variables discriminantes

Il est entendu que l'identification des zones potentielles d'habitat d'hiver nécessite une sélection de variables spécifiques dont l'ensemble est suffisamment discriminant. La figure 3 présente les variables retenues pour l'étude actuelle; ce sont celles citées par les

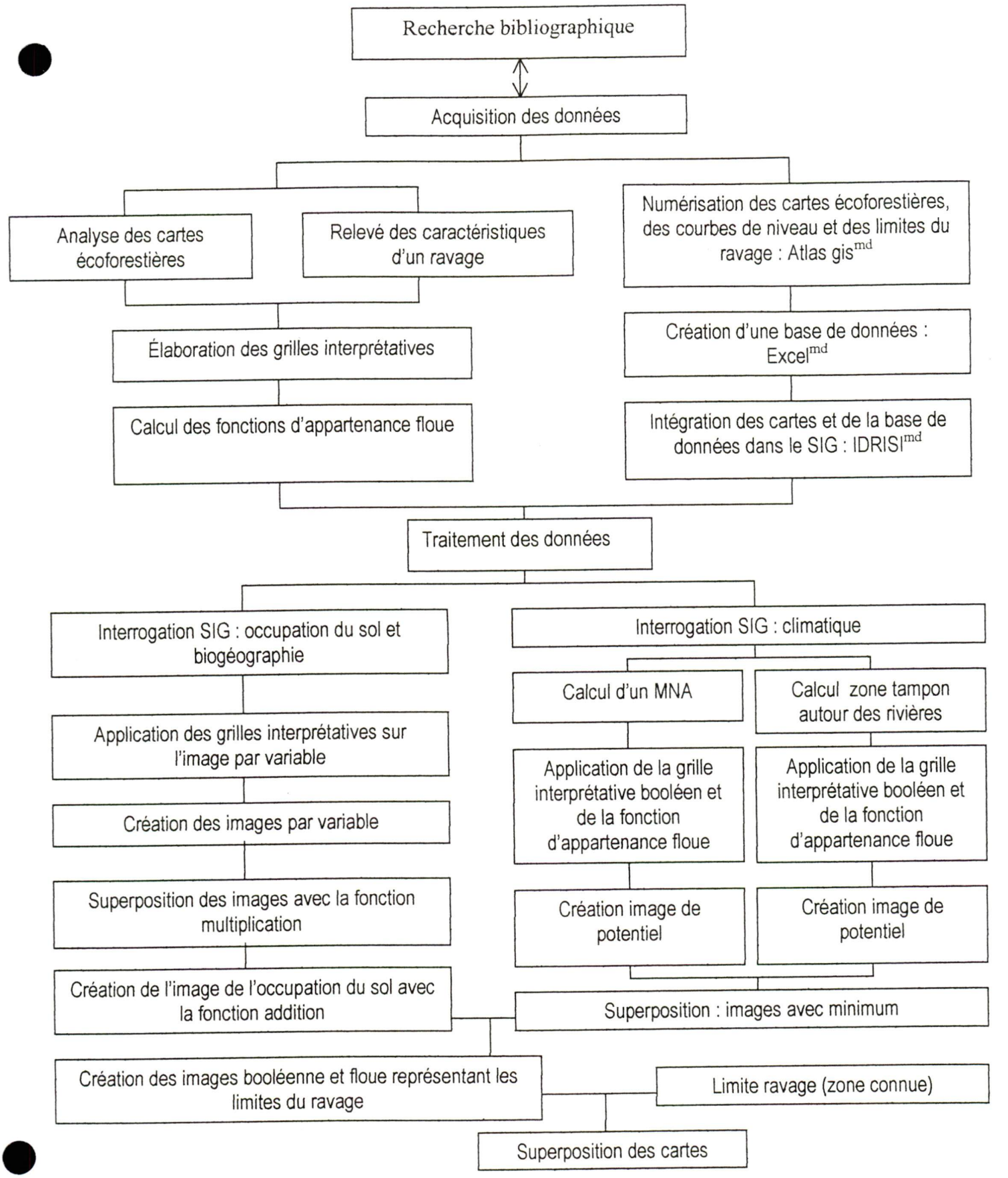


Figure 1: Organigramme méthodologique

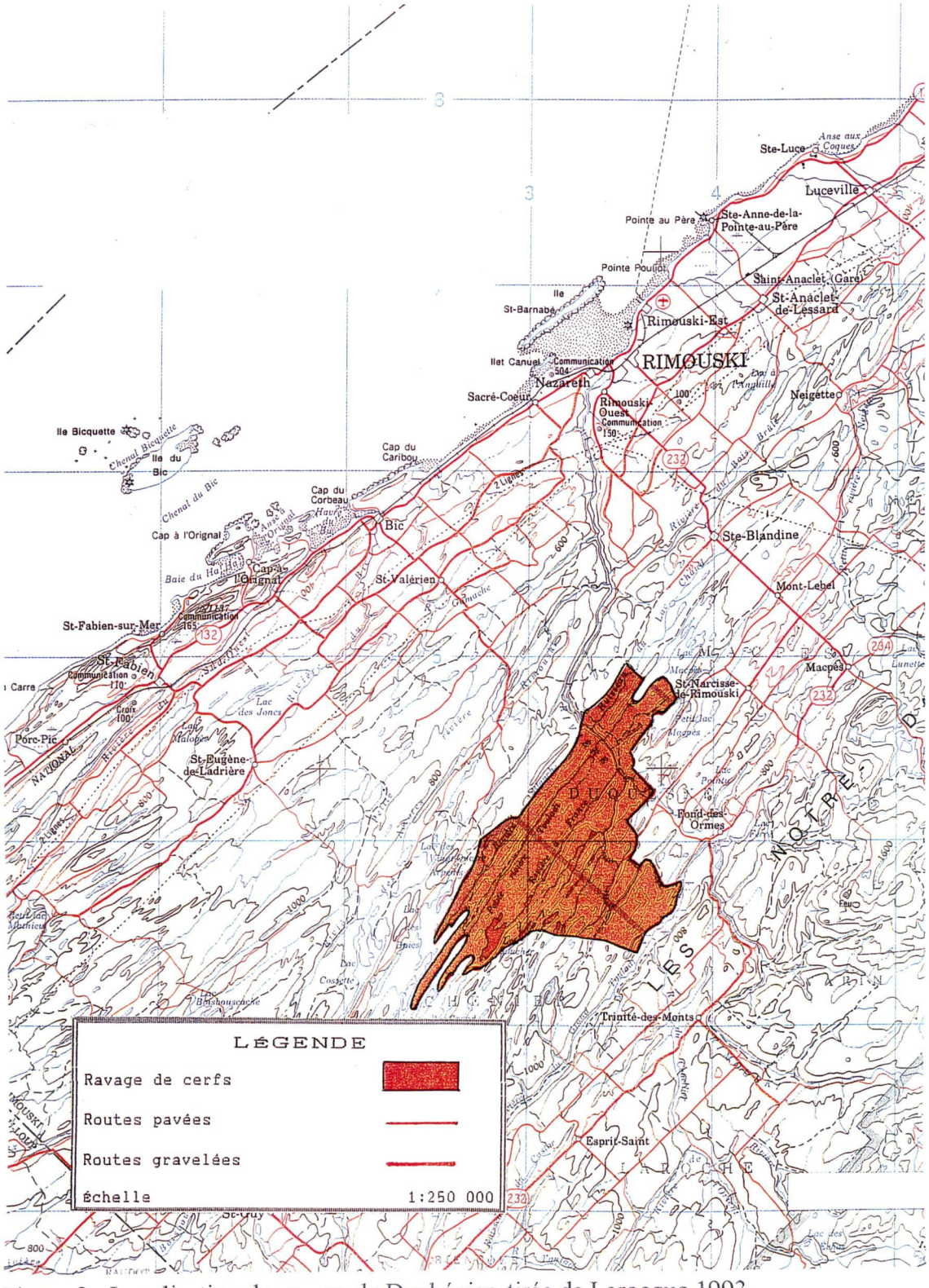


Figure 2 : Localisation du ravage de Duchénier, tirée de Larocque 1993.

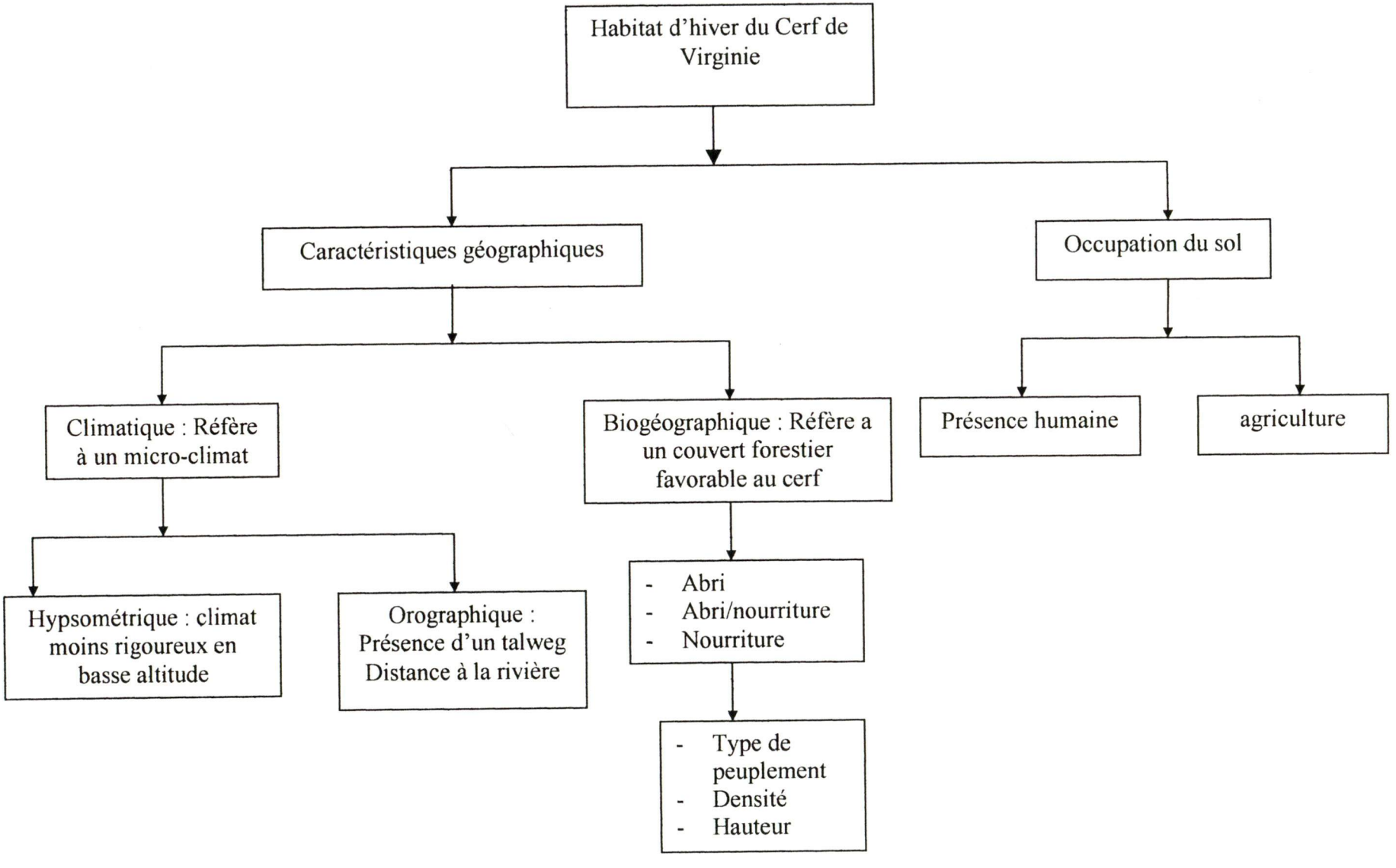


Figure 3 : Présentation des variables discriminantes

différents auteurs comme étant les plus discriminantes (Weber *et al.* 1983; Boer, 1978; Huot, 1974; Lessard, 1974; Germain *et al.* 1991). Pour les variables biogéographiques les ouvrages consultés définissent avec précision les différents couverts favorables au cerf. Cette définition se fait à partir des différentes classes de densité et de hauteur qui caractérisent les couverts forestiers au Québec (tableaux 1 et 2).

Tableau 1 : Classe de densité des peuplements forestiers, Ministères des Forêts.

Densité	Classe de densité
>80%	A
60 à 79%	B
40 à 59%	C
< 40%	D

Tableau 2 : Classe de hauteur des peuplements forestiers, Ministère des Forêts.

Hauteur	Classe de hauteur
>22 m	1
17 à 21 m	2
12 à 16 m	3
7 à 11 m	4
4 à 6 m	5
< 4 m	6

- Les couverts d'abri

La présence d'un abri de qualité répond à deux besoins du cerf de Virginie. Le premier est relié à la présence d'un micro-climat avantageux tandis que le deuxième fait référence à une plus grande facilité de déplacement dans une neige moins épaisse (Germain et Potvin, 1990).

Ils possèdent les caractéristiques suivantes :

- Type de couvert : en général, seul les couverts résineux (plus de 75% du volume en essence résineuse) et les couverts mélangés à tendance résineuse (50 à 75% du volume en essence résineuse) sont aptes à servir d'abri (Germain et Potvin, 1990).
- Densité des peuplements : les couverts résineux et les couverts mélangés à tendance résineuse ayant une densité supérieure à 60 % (classe A et B) fournissent un bon abri pour le cerf.

- Classe de hauteur : Seules les peuplements de classes 1-2-3-4 offrent des conditions d'abri favorable.

• Les couverts d'abri/nourriture

Certains peuplements peuvent être utilisés à la fois comme abri et comme source de nourriture. Ces peuplements d'abri/nourriture regroupent des peuplements résineux ou mélangés à tendance résineuse de hauteur ou de densité trop faible pour fournir un abri réel. Ils comprennent aussi des peuplements mélangés à tendance feuillue qui produisent une strate arbustive riche en nourriture mais limitée en abri.

Ils possèdent les caractéristiques suivantes :

- Type de couverts : Résineux, mélangé à tendance résineuse ou feuillue.
- Densité des couverts : A, B et C
- Hauteur des couverts : Elle varie de 1 à 5 selon la densité du peuplement.

• Les couverts de nourriture

Pour survivre au cours de l'hiver, le cerf doit consommer quotidiennement environ 1 kg de nourriture. La durée moyenne de l'hiver étant estimé à 100 jours, chaque cerf a donc besoin de consommer au minimum 100 kg de nourriture pour satisfaire ses besoins énergétiques (Germain et Potvin, 1991). Il se nourrit principalement des ramilles à sa porté prélevées soit sur des branches basses des arbres et arbustes de moins de 2,25 m de hauteur soit sur des houppiers d'arbres abattus (Germain et Potvin, 1991, Huot, 1974). Le cerf trouve sa nourriture principalement dans les couverts forestiers qui possèdent les caractéristiques suivants :

- Type de peuplement : Le cerf se nourrit dans presque tous les types de couvert forestier. C'est la densité et la hauteur du couvert qui déterminent si il peut servir de nourriture au cerf.
- Densité et hauteur : les couverts denses (classe A et B) pourront être utilisés si leur hauteur est inférieur à 6 m (classe 6) tandis que les peuplements peu denses (classe

D) pourront l'être seulement si leurs hauteurs est supérieure à 6 m (classe 1-2-3-4-5) (Germain et Potvin, 1991, Huot, 1974).

Les tableaux 3 à 5 résument les caractéristiques des sous variables couverts d'abri, couverts d'abri et nourriture et couverts de nourriture.

Tableau 3 : Les couverts d'abri

Type de peuplement	Densité	Hauteur
Résineux	A,B	1-2-3-4
Mélangé (R)	A,B	1-2-3-4

Compilation de Germain et Potvin, 1990; Boer, 1978; Huot, 1974.

Tableau 4 : Les couverts d'abri/nourriture

Type de peuplement	Densité	Hauteur
Résineux	A,B	5
Résineux	C	1-2-3-4-5
Mélangé (R)	A,B	5
Mélangé (R)	C	1-2-3-4-5
Mélangé (F)	A,B	1-2-3-4-5

Compilation de Germain et Potvin, 1990; Huot, 1974.

Tableau 5 : Les couverts de nourriture

Type de peuplement	Densité	Hauteur
Résineux	A,B,C	6
Résineux	D	1-2-3-4-5
Mélangés	A,B,C	6
Mélangés	D	1-2-3-4-5
Feuillus	A,B	5-6
Feuillus	C,D	1-2-3-4-5

Compilation de Germain et Potvin, 1990; Boer, 1978; Huot, 1974

Les variables qui caractérisent l'occupation du sol se définissent comme suit :

- Présence moins grande de l'agriculture

Cette constatation peut paraître à première vue surprenante lorsque l'on considère le fait que le cerf est souvent chassé à l'orée des bois où il est abondant et qu'il est aussi

considéré comme un dévastateur de moissons et de verges (Germain et Potvin, 1991). Mais des études démontrent que lorsque la neige dépasse 40 cm d'épaisseur, le comportement du Cerf change et il fréquente alors peu les vergers. Dans le cas de l'agriculture, il faut mentionner que ce n'est pas tant le dérangement causé par l'activité agricole qui importe que la transformation du milieu associée à une diminution et au morcellement des boisés.

- Présence moins grande d'activité humaine

L'impact des activités humaines sur le cerf a été peu étudié, probablement parce que l'on considère que c'est un animal familier qui vit près des endroits habités. Mais une étude du Ministère du Loisir de la Chasse et de la Pêche (Germain et Potvin, 1991) démontre que la présence d'activités humaines telles que les autoroutes, les camps de vacance, les terrains de camping, dépotoir, etc. à l'intérieur ou en périphérie d'une zone de ravage est préjudiciable au cerf. Afin d'évaluer l'impact de l'activité humaine sur le cerf, les différents éléments cartographiques indiquant la présence d'activité humaine ont été notés selon le modèle suivant :

Valeur 1 : voie d'accès simple, sentier, chemin forestier à une voie, ligne de transport de l'énergie, carrière/gravière, voie ferrée, chalet, terre agricole.
Valeur 2 : voie d'accès à circulation double, route à deux voies (gravier), réseau de chemin à une voie, aire d'atterrissage, terrain de camping, scierie et dépotoir
Valeur 3 : accès multiples, route à deux voies (pavées) ou plus, ville, village, base de plein air, réserve indienne, centre de ski de randonnée ou alpin.

La valeur numérique d'un échantillon (9 km^2) a été définie par la somme de chacune de ses composantes. Exemple : une unité qui comprend une route pavée (3), une route de gravier (2) et une terre agricole (1) a une valeur numérique de 6.

Finalement, les variables climatiques se définissent comme suit :

- Proximité d'une rivière principale

La proximité d'une rivière permet au cerf de s'abreuver tout en lui permettant de s'abriter du vent à l'intérieur d'une vallée (Germain et Potvin, 1991).

- Altitude du site

L'établissement d'une zone de ravage se fait généralement en basse altitude. Cela s'explique facilement par le fait que le climat devient plus rigoureux à mesure qu'on monte en altitude et que les conditions climatiques deviennent plus critiques pour la survie du Cerf (Weber, 1983, Boer, 1978). De plus, la qualité de la nourriture disponible diminue à mesure qu'on s'élève. Ceci est attribuable à la saison chaude écourtée et aux sols moins fertiles (Weber, 1983, Boer, 1978).

6.2.2. Élaboration des grilles interprétatives

Une grille interprétative permet de dégager la logique qui sert à définir les divers niveaux de potentiel (Robitaille et Grondin, 1992). Elle permet de différencier la limite, pour une variable donnée, entre le potentiel maximal et le potentiel minimal. Ces grilles sont la référence de base utilisée lors de l'application de la théorie booléenne puisqu'elles définissent des ensembles de degré d'appartenance 0 et 1.

- Occupation du sol : On sait qu'à l'intérieur d'un ravage, la présence humaine se définit par un indice des activités humaines. Pour la région écologique 5A, l'indice moyen à l'intérieur d'une zone de ravage est de 0,7 ± 0,2 (Germain *et al.*, 1991). L'agriculture pour sa part, se définit en pourcentage de terres agricoles présentes à l'intérieur et en périphérie de la zone de ravage. Pour la région écologique 5A, le pourcentage est de 0,3 ± 0,3% (Germain *et al.*, 1991).
- Biogéographie : Pour les sous variables définissant la biogéographie, des ensembles de critères fixes sont définis dans ce que l'on peut appeler une grille d'identification

des différents couverts favorables au cerf (tableaux 3 à 5). Seulement 2 niveaux de potentiels peuvent ainsi être identifiés : favorable et non favorable (couvert d'abri ou non) puisque les ensembles de critères sont en fait des variables discrètes (aucun niveau intermédiaire possible). Toutefois, ces grilles qui permettent de caractériser les différents couvert aptes au cerf (tableaux 3 à 5) ont été ici, par extension, appelées grilles interprétatives. Elles ont été utilisées intégralement pour interroger la banque de données.

- Caractéristiques géographiques climatiques : Les tableaux 6 et 7 représentent les grilles interprétatives définies pour l'altitude ainsi que pour la distance à la rivière.

Tableau 6 : Grille interprétative pour l'altitude

Altitude minimale (m)	Favorable	Moyen	Faible	Nul
X≤200	X			
200<X≤300		X		
300<X≤425			X	
425<X				X

Compilation de Germain *et al.*, 1991; Weber *et al.*, 1983.

Tableau 7 : Grille interprétative pour la distance à la rivière

Distance à la rivière (m)	Favorable	Moyen	Faible	Nul
X≤2900	X			
2900<X≤3500		X		
3500<X≤4750			X	
4750<X				X

Compilation de Germain *et al.*, 1991; Boer, 1978; Lessard, 1974.

6.2.3. Définition des fonctions d'appartenance floues

L'application de la logique floue a permis « d'étirer » au maximum la nuance entre les niveaux de potentiel d'une grille interprétative. Ainsi, les fonctions d'appartenance f_{Ai} permettent de calculer le degré d'appartenance d'une donnée d'entrée d'une variable V sur une échelle continue ayant valeur dans [0,1] plutôt que sur une échelle fixe {0-1} (Jerabek,1994). Plus spécifiquement, dans le cadre de la présente étude, la fonction d'appartenance trapézoïdale a été préférée à la fonction gaussienne pour calculer le degré d'appartenance des différentes données d'entrées des variables définissant les caractéristiques géographiques climatiques. Elle a été choisie pour sa simplicité qui la rend largement utilisée dans les différents systèmes (Collet, 1995) où elle prend la forme suivante (Terano, 1987) :

$$f_{Ai}= \begin{cases} \dfrac{(x-a_1)}{(a_2-a_1)} & \text{po ur } a_1 \le x \langle a_2 \\ 1 & \text{pour } a_2 < x \le a_3 \\ \dfrac{(x-a_4)}{(a_3-a_4)} & \text{po ur } a_3 \langle x \le a_4 \end{cases} \qquad (6.1)$$

Les fonctions d'appartenance des sous variables : altitude et distance à la rivière ont été calculées à partir des données de la grille interprétative pour l'altitude (tableau 6) et la grille interprétative pour la distance à la rivière (tableau 7) (figures 4 et 5).

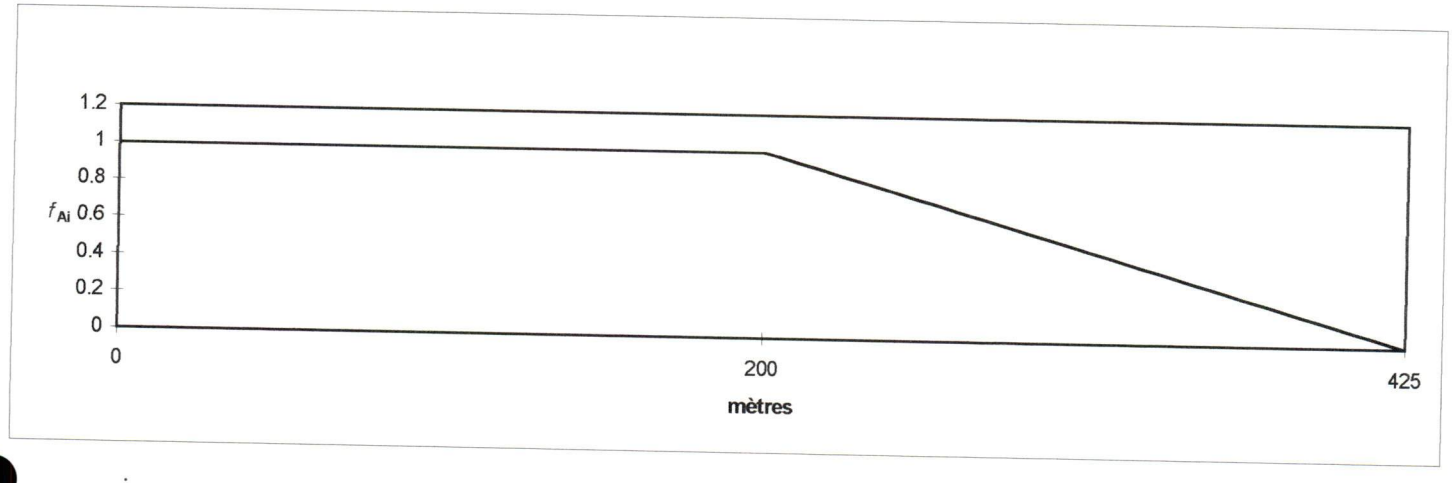


Figure 4 : Fonction d'appartenance floue pour l'altitude

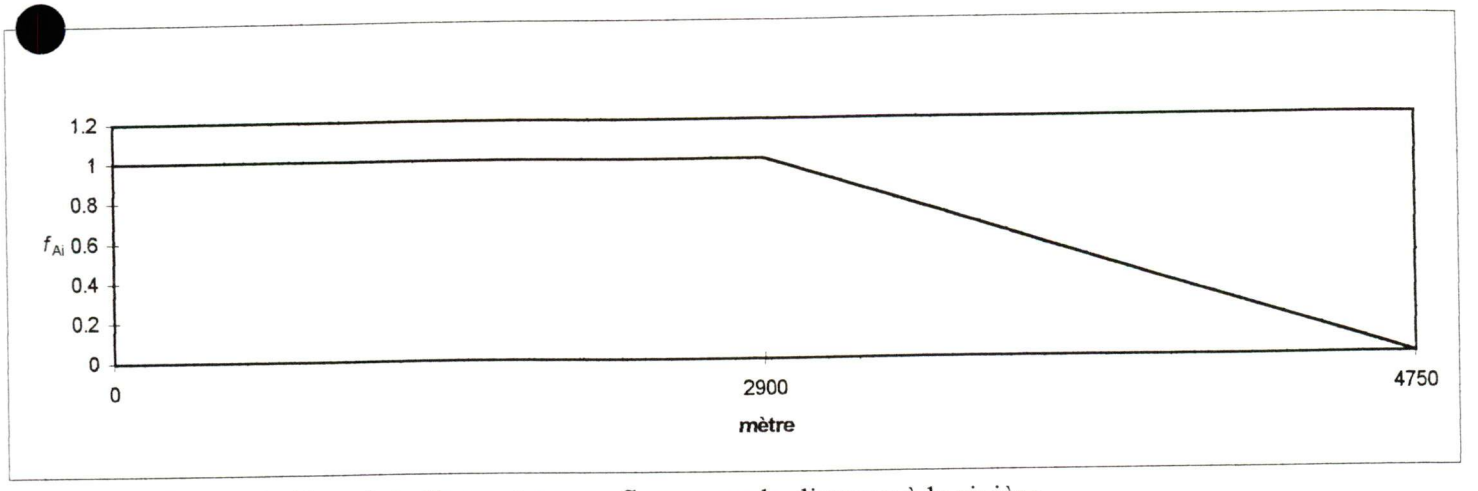


Figure 5 : Fonction d'appartenance floue pour la distance à la rivière

6.2.4. Numérisation des cartes écoforestières

La carte écoforestière a été choisie comme document de base de la présente étude. On y retrouve l'information pertinente (rivière, lac, route, présence humaine, etc.) ainsi que l'information nécessaire à la caractérisation des peuplements forestiers. Les limites du site à l'étude ont été établis en utilisant les routes, les rivières et les lacs comme frontière, elles ont été numérisées en mode ligne. Le site d'étude se trouvait à l'intérieur des cartes écoforestières suivantes : 22 C/1 NO, 22 C/8 SO, 22 C/7 SE et 22 C/2 NE du Ministère des Forêts, Direction de la gestion des stocks forestiers, échelle 1 : 20 000 et publié en 1995.

6.2.5. Numérisation des courbes de niveau

Les courbes de niveau à l'intérieur du site d'étude ont été numérisées à l'aide du logiciel ATLAS Gis ^{md} DOS à partir des cartes topographiques au 1:20 000 suivantes : 22C07-200-0102 Le Bic, 22C01-200-0201 La Trinité-des-Monts, 22C08-200-0101 Sainte-Blandine et 22C02-200-0202 Lac des Baies du Ministère des Ressources Naturelles, à partir des photographies aériennes de 1992, équidistance des courbes de niveau : 10 mètres, publié en 1994.

6.2.6. Numérisation des limites du ravage de Duchénier

Les limites réelles du ravage de Duchénier ont été numérisées à partir de la carte : localisation du ravage de Duchénier au 1 :250 000 (Larocque, 1993). Cette frontière est reconnue par le Ministère des Loisirs, de la Chasse et de la Pêche. Un changement d'échelle a été fait à l'aide du logiciel Atlas Gis[md] afin d'amener le document à l'échelle de travail 1 : 20 000.

6.2.7. Création de la base de données écoforestières

Les éléments caractéristiques de chaque polygone écoforestier numérisé ont été inscrits dans une base de données écoforestières créée avec le logiciel Microsoft Excel '97[md].

6.2.8. Enregistrement des données

Tous les documents numérisés ont été transférés en mode vectoriel puis en mode image dans le logiciel de traitement des données IDRISI[md] version 2 pour Windows '95 selon le format suivant :

Projection : Longitude, Latitude, Nad 83
Pixels : 45 m
Colonnes : 547
Lignes : 676.
Le logiciel IDRISI[md] a été choisi principalement pour son module de traitement flou des données.

6.3. Traitement des données

6.3.1. Création de l'image représentant l'occupation du sol et la biogéographie pour la zone à l'étude.

Comme IDRISI[md] ne permet de coupler que deux images à la fois, des images de densités, de hauteurs et de peuplements ont été créées en appliquant à la base de données la portion des grilles interprétatives correspondantes. Pour chaque type de couvert, les images densité et hauteur ont été couplées, créant de nouvelles images auxquelles ont été couplées les images peuplements. La formule suivante résume, à titre d'exemple, le procédé pour le couvert d'abri (voir grille interprétative correspondante):

[(image résineux) * (image densité A ou B)] * image hauteur 1ou 2ou 3 ou 4= abri 1

+

[(image mélangé (R))*(image densité A ou B)]*image hauteur 1 ou 2 ou 3 ou 4= abri 2

Carte couvert d'abri

Les rivières, lacs et limites du ravage ont été ajoutés afin de créer une image complète de la réalité.

6.3.2. Création de l'image booléenne pour l'altitude

Pour créer l'image représentant l'altitude, un modèle numérique d'altitude a été développé à l'aide d'une procédure d'interpolation d'IDRISI[md]. Cette dernière a permis de calculer l'altitude de chaque pixel situé entre les courbes de niveau numérisées en mode ligne. À partir de ce modèle et de la grille interprétative définissant l'altitude (tableau 6) une image représentant le potentiel du territoire a été créée.

6.3.3. Création de l'image booléenne pour la distance à la rivière

Les principales rivières du secteur d'étude ont été isolées puis une nouvelle image représentant la distance de chaque pixel à une rivière a été créée. Finalement, une image représentant le potentiel du territoire pour la distance à la rivière a été créée à l'aide de la grille interprétative pour la distance à la rivière (tableau 7).

6.3.4. Création de l'image booléenne représentant les caractéristiques climatiques

L'image représentant le potentiel du territoire selon les caractéristiques climatiques a été calculée en superposant l'image de l'altitude et celle de la distance à la rivière. La fonction minimum a été utilisée pour faire le calcul. Cette fonction a été choisie puisque la valeur résultante d'un pixel donné ne peut jamais être plus grande que le potentiel le plus faible attribué à ce pixel.

6.3.5. Cartographie de l'habitat d'hiver du Cerf de Virginie : Booléen

La dernière étape du traitement consiste à définir les limites du ravage à partir des données et des images disponibles. Ainsi, afin de délimiter la zone de ravage, les zones booléennes favorables aux cerfs ainsi que les couverts d'abri ont été isolés afin de créer une image représentant les couverts d'abri situés dans une zone favorable. Les couverts d'abri ainsi que les zones favorables ont été sélectionnés comme éléments de base du calcul puisqu'un cerf qui a le choix entre une nourriture abondante et un abri non favorable et un abri favorable et moins de nourriture choisira d'hiverner là où l'abri est favorable (Germain et Potvin, 1990). À partir de cette image représentant les couverts d'abri dans une zone favorable, une zone tampon de 500 mètres a été calculé autour des couverts d'abri puisqu'un cerf pour survivre doit trouver une nourriture de qualité à l'intérieur d'un rayon de 500 mètres d'un abri. (Germain et Potvin, 1990).

L'image créée a ensuite été classée afin de ne faire ressortir que la zone à l'intérieur du 500 mètres de rayon. Cette image représente les limites calculées du ravage. Une fois les

limites trouvées, l'occupation du sol ainsi que la biogéographie (couverts d'abri, abri/nourriture et nourriture) ont été ajoutées à l'intérieur de ces limites afin de compléter la cartographie. À partir de cette image, il est possible de calculer la superficie en hectares des différents couverts favorables aux cerfs ainsi que le pourcentage de terres agricoles présentes ainsi que l'indice des activités humaines. Afin de calculer l'indice des activités humaines à l'intérieur de la zone ainsi délimitée, les différents indicateurs de présence humaine ont été isolées puis reclassées afin de leurs attribuer l'indice correspondant. La valeur numérique d'un échantillon de 9 km² a été définie par la somme de chacune des composantes.

6.3.6. Création de l'image floue pour l'altitude

Le modèle numérique d'altitude créé à la section 6.3.2 a été utilisé pour ce traitement. La fonction d'appartenance floue pour l'altitude minimale (figure 4) a été appliquée au modèle afin de créer une nouvelle image avec le module flou d'IDRISI[md]. Les pixels de cette image varient entre 0 et 1.

6.3.7. Création de l'image floue pour la distance à la rivière

L'image représentant la distance d'un pixel à une rivière (section 6.3.3) a été utilisée pour la calcul flou. La fonction d'appartenance floue pour la distance à la rivière (figure 5) a été appliquée afin de créer une nouvelle image avec le module flou d'IDRISI. Les pixels de cette image varient entre 0 et 1.

6.3.8. Création de l'image floue représentant les caractéristiques climatiques

Tout comme pour les ensembles classiques, différentes opérations mathématiques s'appliquent aux ensembles flous. En effet, les opérations mathématiques entre les ensembles flous sont essentiellement des généralisations des opérations entre des ensembles classiques (Jerabek, 1994). C'est pourquoi les notions d'intersection et d'union, entre autres, sont utilisées en logique floue. Plus particulièrement dans l'actuel

projet, c'est la notion d'intersection entre deux ensembles flous qui est intéressante puisque la création d'une nouvelle image à partir de celles créées aux sections précédentes passe par l'intersection. En effet, ce qui est recherché c'est le degré d'appartenance d'un pixel qui répond aux règles suivantes :

Si Altitude minimale X Et Si distance à une rivière Y Alors degré XY= ?

On peut représenter cette règle sous la forme générale suivante :

Si prémisse *Et Si* prémisse *Alors* Action

L'intersection de deux sous-ensembles flous A et B de X est le sous-ensemble flou constitué des éléments de X affectés du plus petit de leurs deux degrés d'appartenance, donnés par f_A et f_B. Elle est définie comme l'élément C=A∩B de F(X) tel que:

$$\forall x \in X \qquad f_C(x) = \min(f_A(x), f_B(x)) \tag{6.2}$$

où min désigne minimiser.

L'image floue représentant les caractéristiques géographiques a donc été calculée en sélectionnant les deux images calculées précédemment et en utilisant la fonction minimum. À l'instar des recherches antérieures (Davidson,1993 et Hall *et al*, 1992) les classes suivantes ont ensuite été créées

0,96<X, 0,88-0,96, 0,85-0,88, 0,75-0,85, 0,55-0,75, 0,50-0,55, 0,35-0,50, 0,075-0,35 et x<0,075 où X>0,96 signifie très favorable au cerf et X<0,075 signifie nul pour le cerf.

6.3.9. Cartographie de l'habitat d'hiver du Cerf de Virginie : flou

La même procédure que celle utilisée à la section 6.3.5 a été utilisée pour l'image floue à la différence que la limite de la zone favorable est le degré d'appartenance 0,85 degré d'appartenance qui revient régulièrement dans les différentes études sur le sujet (Davidson,1993 et Hall *et al.* 1992). La même procédure a été appliquée afin de délimiter la zone de ravage.

6.3.10. Calcul de l'indice de la présence humaine

Pour calculer l'indice moyen de la présence humaine, de chaque carte résultante, tous les éléments cartographiques de nature humaine ont été isolés afin de créer de nouvelles images. Une zone échantillon de 9 km², définie sur un acétate, a été déplacée sur les images résultantes afin de calculer la valeur numérique de chaque échantillon. La moyenne a ensuite été calculée afin de déterminer la valeur moyenne pour l'image.

7. Résultats

7.1. Carte d'occupation du sol et de la biogéographie de la zone à l'étude

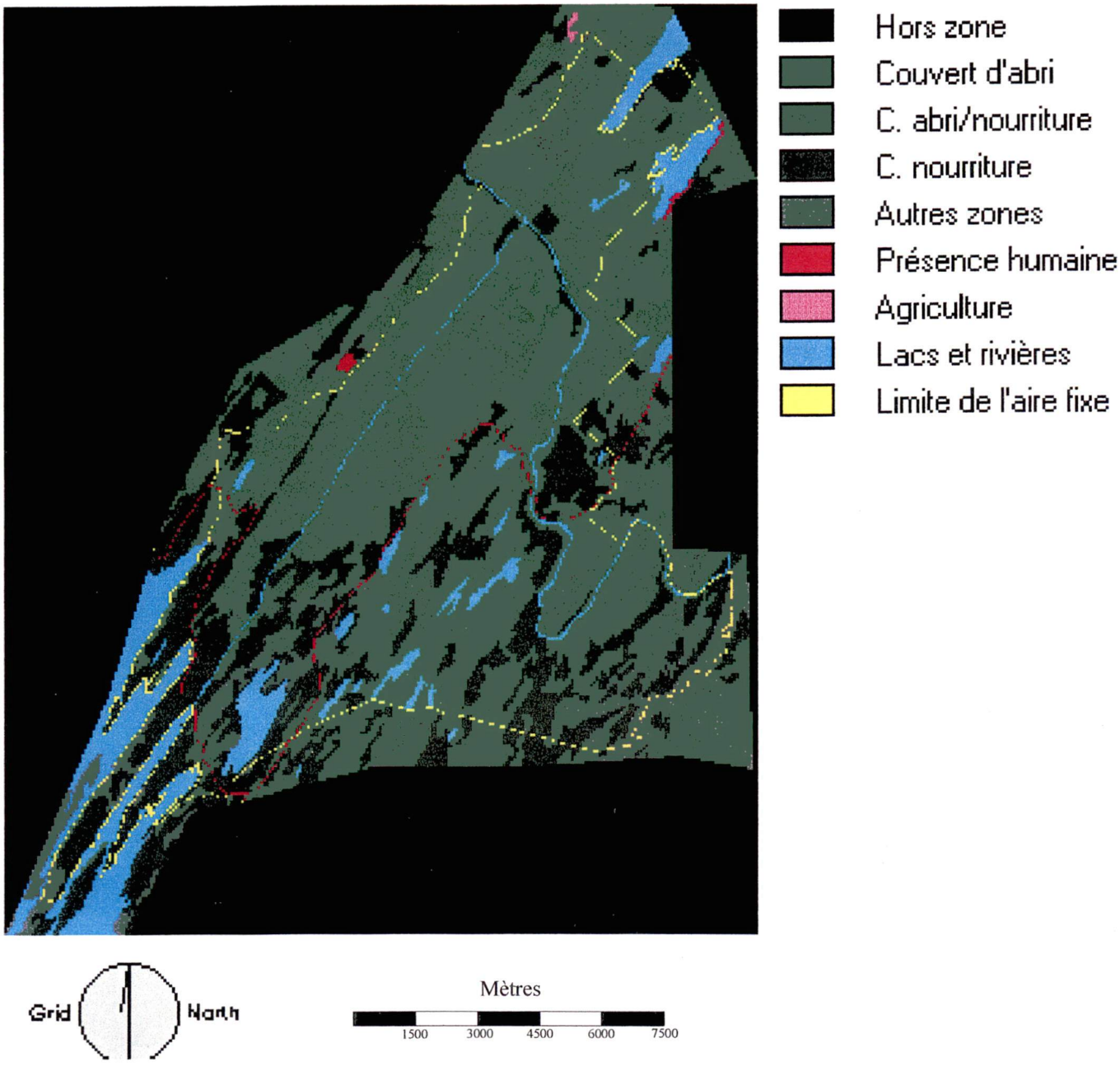
La carte illustrée à la figure 6 représente la distribution de chacune des sous variables qui sont favorables et non favorables au cerf ainsi que les limites du ravage reconnues par le Ministère du Loisir de la Chasse et de la Pêche. Le tableau 8 présente le résultat pour chacune de ces sous variables à l'intérieur des limites réelles du ravage de même que, pour fin de comparaison, à l'intérieur de la zone à l'étude. À cet effet, il faut remarquer les différences de proportion dans la distribution des couverts d'abri et d'abri/nourriture, semblable pour la zone d'étude et le ravage, mais qui semblent inversées par rapport à la norme régionale.

Tableau 8 : Composition du territoire à l'étude

Variable	Ravage réel	Zone à l'étude	Norme pour la région écologique 5A[1]
Couverts d'Abri	25%	23,7%	39,2±5,2%
Couverts d'abri/nourriture	36,9%	37,8%	24,8±3,5%
Couverts de nourriture	23,4%	25%	22,1±4,3%
Présence humaine	0,54	0,65	0,7 ± 0,2
Agriculture	0%	0,06%	0,3±0,3%

[1]tiré de Germain *et al.*, 1991.

La proportion de couverts d'abri, calculée à l'intérieur des limites réelles du ravage et à l'intérieur de la zone à l'étude est de 25% et de 23,7% respectivement comparativement à la norme de 39,2±5,2%. Cette différence peut s'expliquer par le fait que la plus petite unité cartographique d'une carte écoforestière est de deux hectares et qu'un cerf peut retrouver un abri de qualité dans seulement 0,2 hectare. La carte écoforestière sous-estime probablement la présence des couverts d'abri malgré qu'elle soit jugée adéquate pour le suivi des différents habitats (Germain *et al.*, 1991).



Source : Cartes écoforestières suivantes :
22 C/1 NO, 22 C/8 SO, 22 C/7 SE et 22 C/2 NE
du Ministère des Forêts, échelle : 1 : 20 000
Photographies aériennes 1993, publié en 1995

Martin Valcourt
Mai 1999

Figure 6 : Carte d'occupation du sol et de la biogéographie de la zone à l'étude.

7.2. Carte de la classification booléenne des caractéristiques climatiques

La figure 7 représente la répartition spatiale des quatre classes de potentiel du territoire lorsqu'on superpose les deux variables climatiques. Ces variables ont la même influence sur la qualité de l'habitat d'hiver. Ainsi, pour un polygone donné, le potentiel ne peut jamais être plus élevé que le potentiel le plus faible. La zone favorable représente une superficie de 36,1% du territoire à l'étude dont 79,6% se trouve à l'intérieur des limites réelles du ravage.

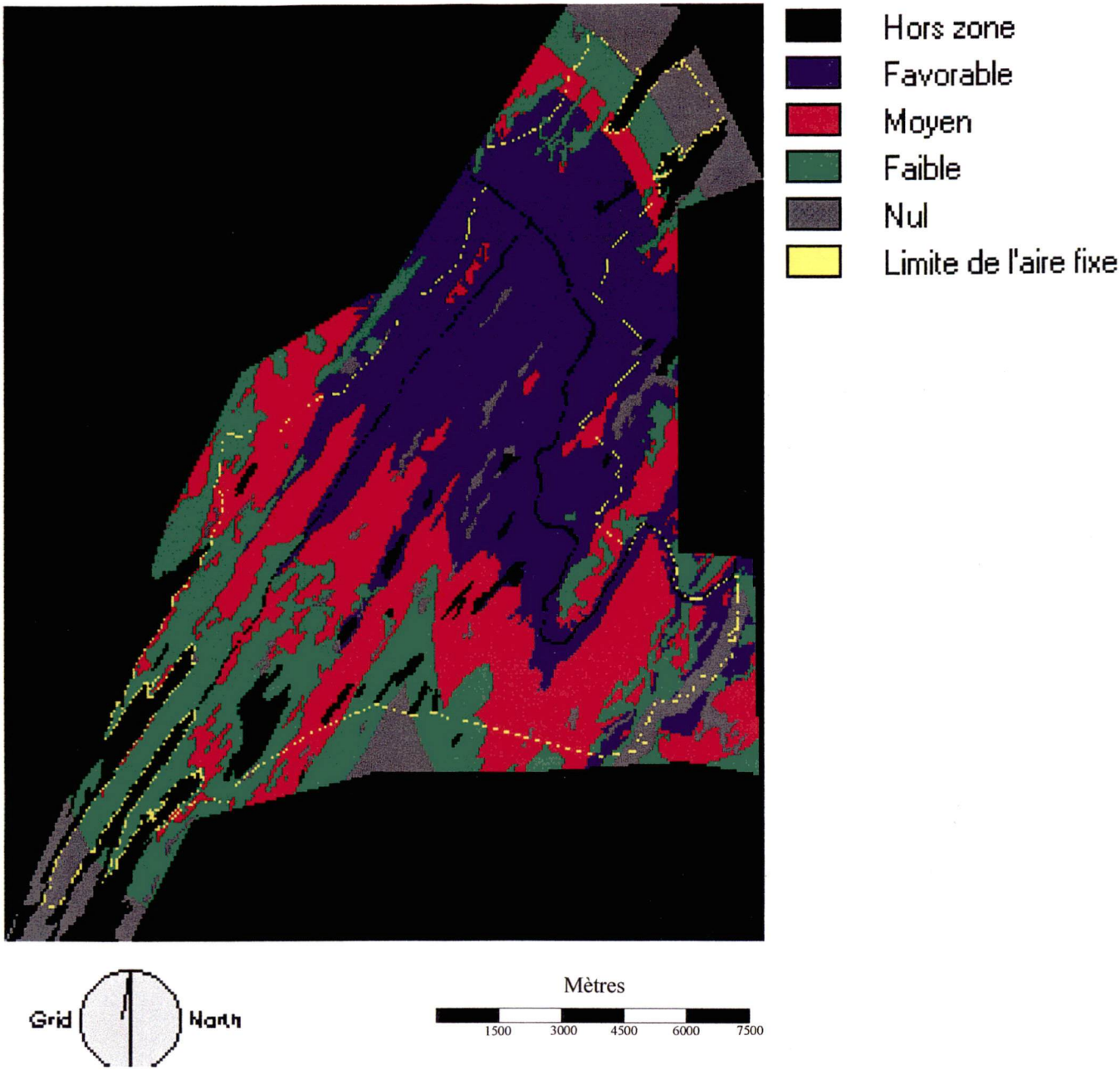
7.3. Cartographie de l'habitat d'hiver du Cerf : Booléen

La figure 8 représente la zone de ravage identifiée. La superficie totale délimitée est de 8 745,6 hectares, comparativement à une superficie de 10 040 hectares pour le ravage réel. De celle-ci, 6 718,8 hectares (76,8%) sont à l'intérieur des limites reconnues par le Ministère du Loisir de la Chasse et de la Pêche alors que la superficie restante (23,2%) se situe dans la zone limitrophe du ravage. Ainsi, 66,9% du ravage réel a été reconnu par la procédure. Au niveau de la composition du territoire (tableau 9), les valeurs déterminées semblent respecter la norme du Ministère sauf pour les couverts de nourriture qui sont en proportion plus faible et les couverts d'abri/nourriture qui sont en proportion plus grande.

Tableau 9 : Composition du ravage identifiée : théorie booléenne

Variable	Ravage identifié	Moyenne pour la région écologique 5A[1]
Couverts d'Abri	33,1%	39,2±5,2%
Couverts d'abri/nourriture	39,3%	24,8±3,5%
Couverts de nourriture	14,9%	22,1±4,3%
Présence humaine	0,34	0,7±0,2
Agriculture	0%	0,3±0,3%

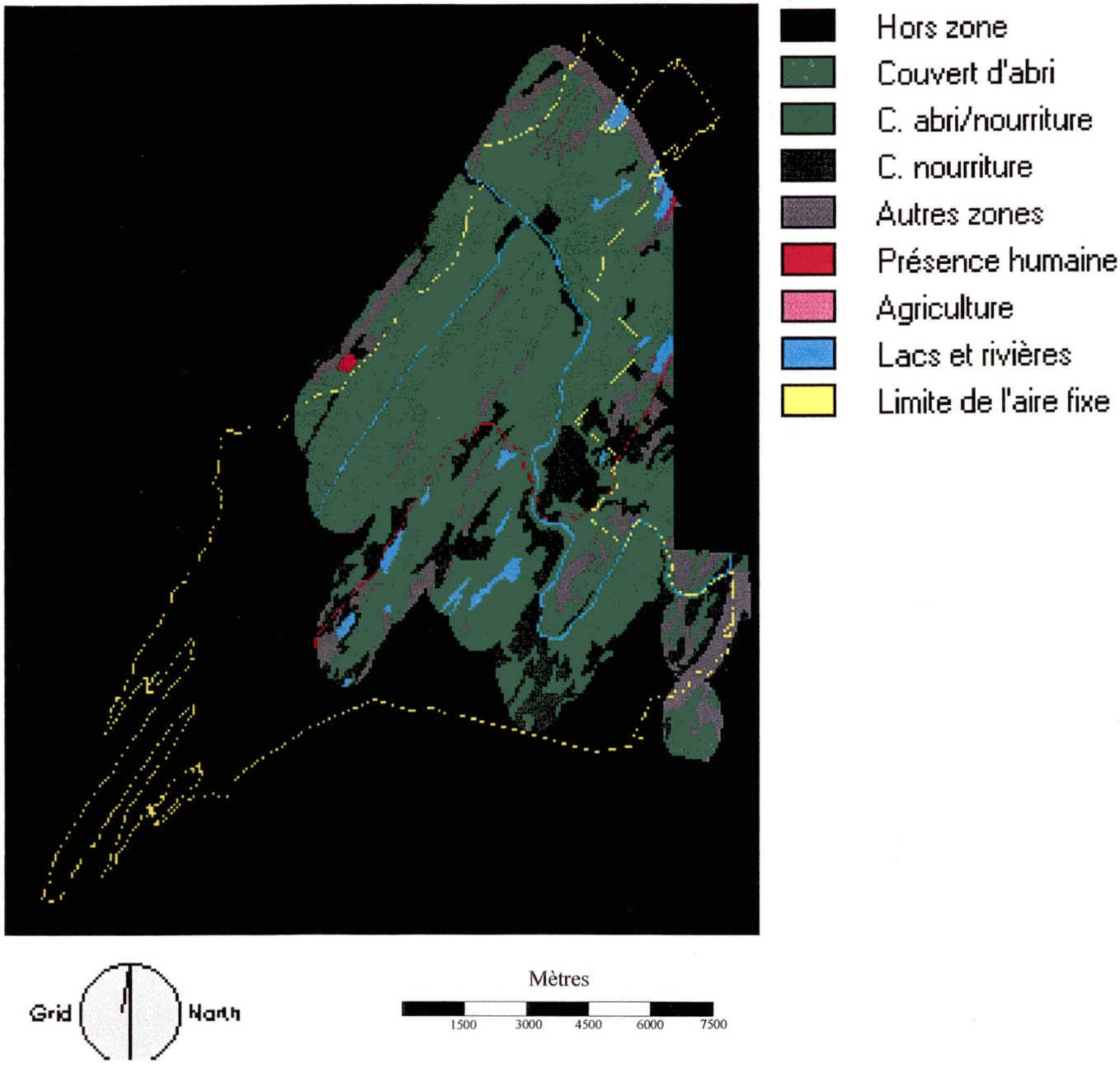
[1] Tiré de Germain *et al.*, 1991.



Source : Cartes écoforestières suivantes :
22 C/1 NO, 22 C/8 SO, 22 C/7 SE et 22 C/2 NE
du Ministère des Forêts, échelle : 1 : 20 000
Photographies aériennes 1993, publié en 1995

Martin Valcourt
Mai 1999

Figure 7 : Classification booléenne des caractéristiques climatiques



Source : Cartes écoforestières suivantes :
22 C/1 NO, 22 C/8 SO, 22 C/7 SE et 22 C/2 NE
du Ministère des Forêts, échelle : 1 : 20 000
Photographies aériennes 1993, publié en 1995

Martin Valcourt
Mai 1999

Figure 8 : Cartographie de l'habitat d'hiver du Cerf de Virginie : Booléen

7.4. Carte de la classification floue des caractéristiques climatiques

L'utilisation de la fonction minimum permet de créer une image qui tient compte du degré d'appartenance de chaque pixel ce qui fait qu'on obtient neuf « classes » de potentiel au lieu de quatre (figure 9). La zone favorable représente ici une superficie de 54,0% (o,85 et plus) du territoire à l'étude dont 80,8% se retrouve à l'intérieur des limites réelles du ravage

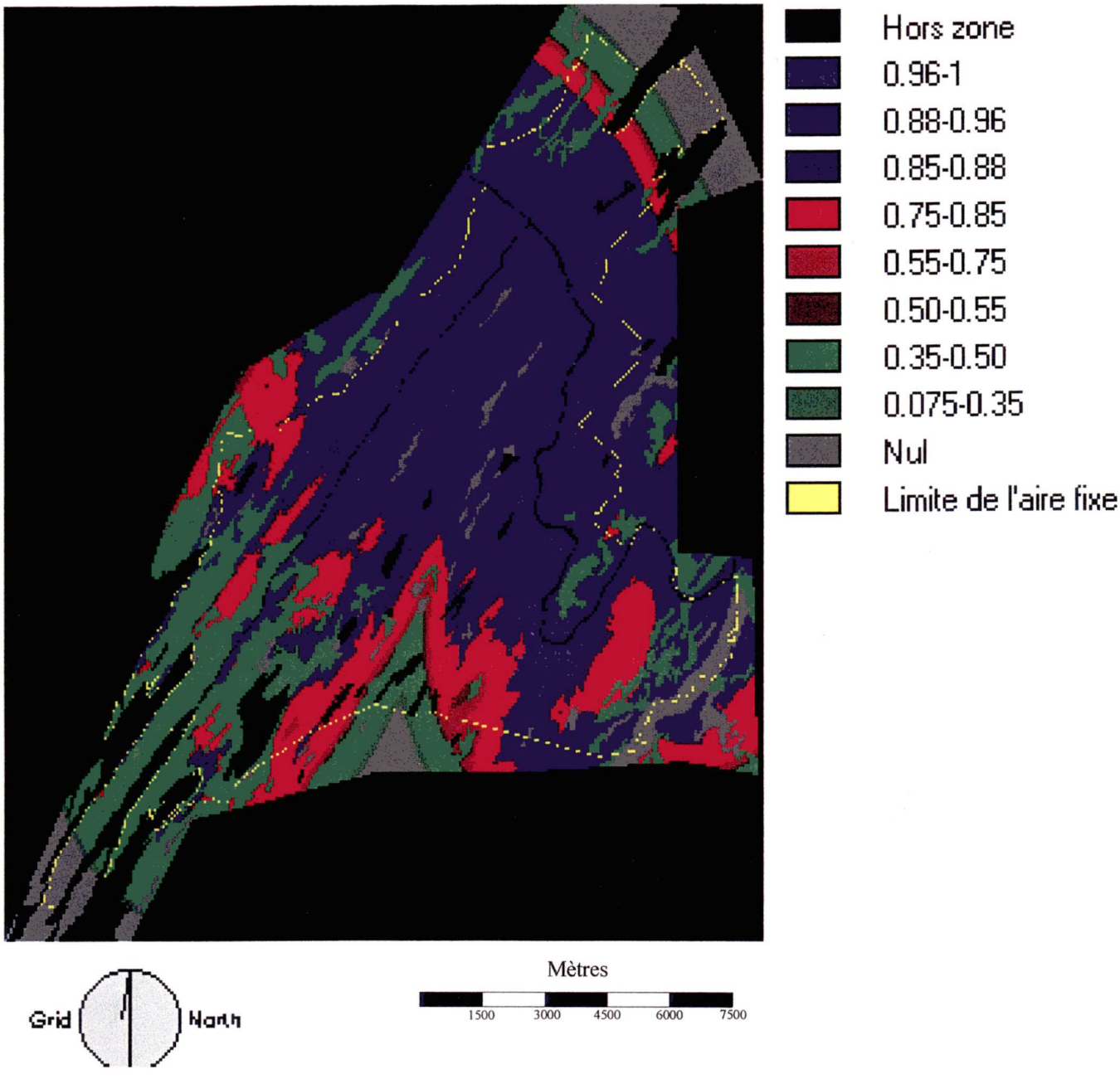
7.5. Cartographie de l'habitat d'hiver du Cerf : floue

La figure 10 représente la zone de ravage délimitée par la procédure à l'aide de la logique floue. La superficie totale délimitée est de 9 979,6 hectares. De celle-ci, 7 433,6 hectares (75,5%) sont à l'intérieur des limites reconnues du ravage ce qui représente 74,1% du dit territoire. Le territoire identifié en utilisant la logique floue est donc plus près de la réalité que celui délimité en utilisant la théorie booléenne (66,9%). La superficie restante (24,5%) se situe dans le pourtour supérieur du ravage, elle est très près du résultat booléen. La composition du territoire identifié respecte également la norme du Ministère (tableau 10) à l'exception des couverts de nourriture qui, en outre, sont de proportion quasi similaire à celle pour le booléen.

Tableau 10 : Composition du ravage identifié : théorie floue

Variable	Calculés à partir de la carte	Moyenne pour la région écologique 5A[1]
Couverts d'Abri	32,1%	39,2±5,2%
Couverts d'abri/nourriture	40,2%	24,8±3,5%
Couverts de nourriture	16,4%	22,1±4,3%
Présence humaine	0,34	0,7±0,2
Agriculture	0%	0,3±0,3%

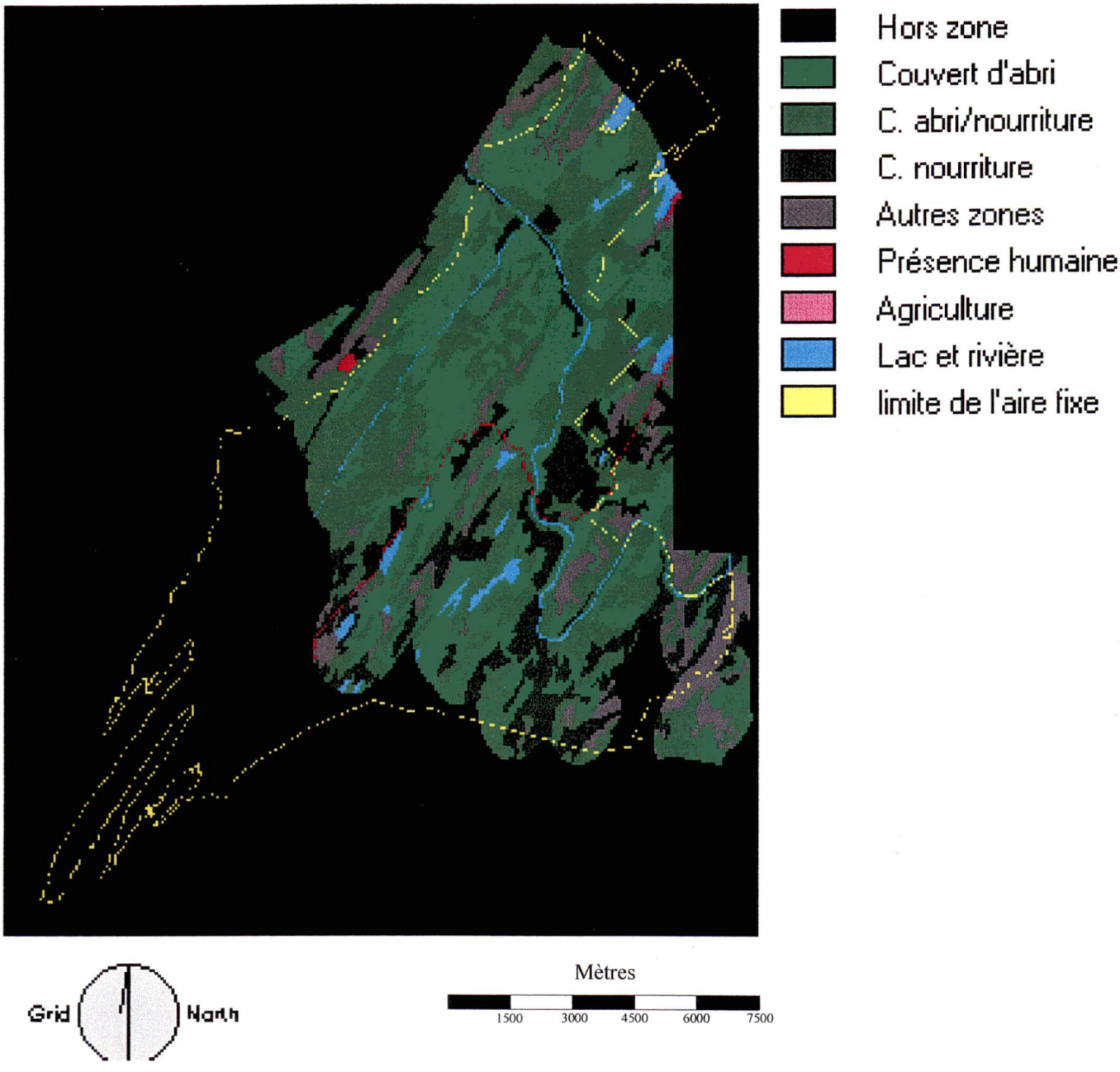
[1] Tirées de Germain *et al.*, 1991.



Source : Cartes écoforestières suivantes :
22 C/1 NO, 22 C/8 SO, 22 C/7 SE et 22 C/2 NE
du Ministère des Forêts, échelle : 1 : 20 000
Photographies aériennes 1993, publié en 1995

Martin Valcourt
Mai 1999

Figure 9 : Classification floue des caractéristiques climatiques



Source : Cartes écoforestières suivantes :
22 C/1 NO, 22 C/8 SO, 22 C/7 SE et 22 C/2 NE
du Ministère des Forêts, échelle : 1 : 20 000
Photographies aériennes 1993, publié en 1995

Martin Valcourt
Mai 1999

Figure 10 : Cartographie de l'habitat d'hiver du Cerf de Virginie : Floue

8. Interprétation des résultats et discussion

Lorsqu'on observe les cartes des caractéristiques climatiques on constate que la superficie favorable délimitée est très restreinte. On comprend que dans le système étudié, le climat est sans doute le facteur influençant le plus dans l'ensemble des caractéristiques favorables au cerf. Ce résultat partiel devient par surcroît intéressant à étudier en comparant le résultat booléen (36,1%) au résultat flou (54,0%). Tel qu'attendu, la méthode floue permet de nuancer l'analyse de la variable à l'instar de l'intelligence humaine ou de l'instinct animal, et de délimiter un territoire plus près de la réalité. On pourrait croire qu'en conservant les catégories favorables et moyennement favorables, on obtiendrait un résultat encore plus près de la réalité. Rappelons toutefois, que les limites de l'aire fixe ont été établies en 1989. Lorsqu'on observe l'aire d'occupation du Cerf en 1993 (figure 11), on constate que la superficie identifiée reflète la réalité de ce moment.

En fait, l'analyse des différentes aires d'occupation du Cerf depuis 1983 démontre qu'en 1993 le cerf a restreint son territoire et qu'il occupe la portion centre et nord du ravage. La diminution de l'aire d'occupation peut être attribuée, entre autres raisons majeures à l'épidémie de tordeuses qui a sévi dans la portion sud du ravage (Larocque, 1993). Il semble donc que cette portion du territoire présentait moins d'attrait en raison de la dégradation des couverts susceptibles de servir d'abri. Alors, on peut supposer que si le cerf retrouve un abri de qualité dans une zone climatique moyennement favorable, il occupera cette zone. Ainsi, on peut extrapoler et constater que même en délimitant un territoire climatique plus grand (zones favorables et moyennement favorables), lorsque la variable abri serait appliquée, on n'obtiendrait pas un territoire beaucoup plus grand vue la disparition des couverts d'abri dans le sud du ravage réel. Ceci permet d'affirmer que la méthode reproduit bien le comportement du Cerf. Toutefois, il faut retenir qu'effectivement, la sélection d'une zone climatique plus grande permettrait d'obtenir des résultats plus justes.

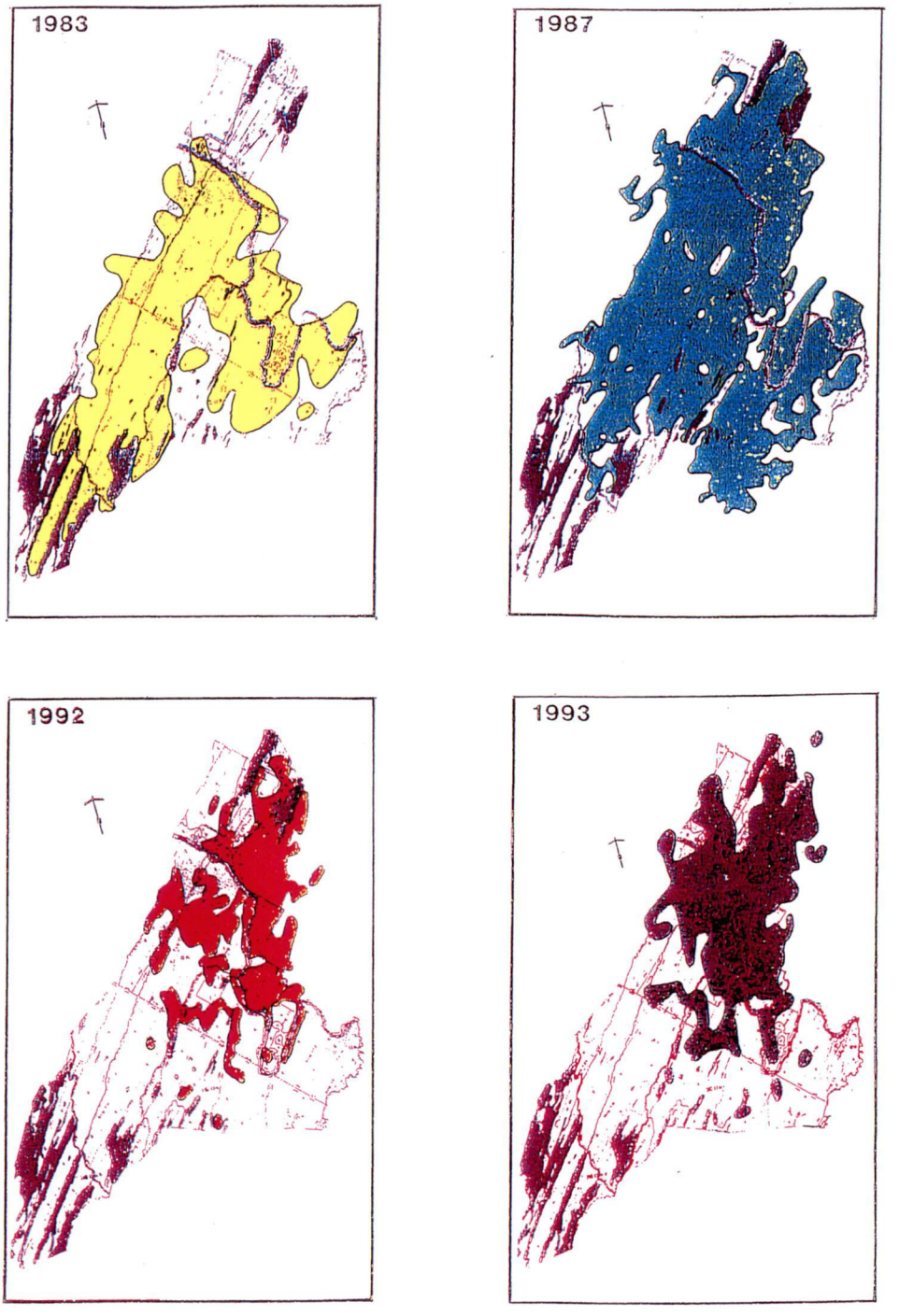


Figure 11 : Aire d'occupation du Cerf de Virginie dans le ravage de Duchénier, tiré de Larocque, 1993.

Pour ce qui est de la cartographie finale, l'utilisation de la logique floue permet encore une fois d'obtenir un résultat plus juste (74,1%) que l'approche booléenne (66,9%) et ce avec une superficie hors zone de ravage comparable (24,1% et 23%). C'est ainsi que l'on voit que la logique floue, dans son raffinement, permet d'aller chercher le maximum de potentiel tout en conservant la capacité de discrimination du système. Les résultats obtenus semblent à première vue plutôt faibles. Mais encore une fois si on les compare à la zone d'occupation du Cerf (figure 10) pour 1993, on constate que dans les deux cas la zone délimitée englobe l'aire d'occupation. Cette aire d'occupation est considérée comme une zone à fort potentiel, fréquentée depuis plusieurs années.

Si on avait utilisé les cartes forestières de 1986, avant l'épidémie de tordeuse, on peut supposer que la présence de couverts d'abri dans la portion attaquée aurait permis un gain de territoire d'environ 5% (booléen) et 8% (floue). Ces résultats auraient alors été près des résultats obtenus lors d'études semblables dont la moyenne est d'environ 80% pour le booléen (Mladanoff et Sickley, 1998; Skidmore et Walker 1996) et de 85% pour le flou (Hall, 1992). Si on avait pris aussi en considération les zones moyennement favorables alors les résultats obtenus auraient sûrement été très proches et même supérieurs aux résultats de ces études.

Les résultats représentant la composition du territoire (tableaux 7 et 8) démontrent que les sous variables définissant l'occupation du sol c'est-à-dire la présence humaine et l'agriculture sont dans les deux cas inférieures à la norme gouvernementale. L'intérêt est que ces variables sont défavorables au cerf. Par contre, on constate que les peuplements de nourriture ont une superficie nettement plus faible que la norme gouvernementale même en tenant compte des différences relatives à la zone à l'étude. Ceci est peut-être attribuable à la façon de délimiter la zone en favorisant les peuplements d'abri au détriment des couverts de nourriture. Il faut souligner qu'entre une zone climatique favorable et une autre moins favorable avec présence de nourriture, le cerf choisira la zone climatique favorable (Germain et Potvin, 1990). De plus, la superficie importante des couverts d'abri/nourriture permet de croire que le cerf retrouvera dans ces

peuplements une nourriture acceptable capable de compenser le manque de couverts de nourriture stricte.

Notons finalement que le travail le plus ardu, dans la mise au point de la méthode, a été la numérisation des carte écoforestières et la création de la base de données qui les accompagne. Il faut noter toutefois, que le Ministère des Ressources Naturelles a entrepris la numérisation de ces cartes écoforestières ainsi que la création des bases de données afin de les rendre disponibles. C'est d'ailleurs une des raisons qui justifie le choix de la carte écoforestière comme document de base à ce projet. Ainsi, il est permis de dire que la méthode développée lors de ce projet est plus conviviale que la méthode traditionnelle puisqu'elle permet un traitement rapide de l'information malgré que le système oblige à plusieurs étapes intermédiaires. La performance des outils informatiques à ce jour rend quasi négligeable cet élément. En outre, en n'utilisant pas de modèles mathématiques complexes, on rend le processus plus accessible par rapport aux autres études. Il serait même intéressant de faire une étude comparative entre le modèle actuel et ceux utilisant un modèle mathématique du coût d'investissement dans la mise au point d'une méthode par rapport à son efficacité.

L'utilisation de ces cartes permet de faire ressortir les différents couverts forestiers favorables au cerf à partir de leurs caractéristiques : type de peuplement, densité et hauteur. Certains auteurs (Sirois, 1986 et Congalton *et al.* 1993) utilisent une image satellite afin de produire une classification forestière du territoire à l'étude. Actuellement, ces images ne semblent pas permettre une classification exhaustive des différents couverts forestiers, classification qui permettrait de faire ressortir avec précision les couverts d'abri favorables au cerf. En effet, Congalton *et al.* (1993) parviennent à une précision de 66% lorsqu'ils comparent le résultat de la classification obtenue à partir de l'image avec la réalité terrain. Ce résultat est d'ailleurs considéré par les auteurs comme étant l'élément limitant à l'intérieur de la procédure et ils recommandent de faire des études plus approfondies sur le sujet avant d'utiliser l'image satellite classique.

9. Conclusion

Les résultats obtenus permettent de conclure qu'il est possible d'identifier l'habitat d'hiver du Cerf de Virginie en utilisant un SIG où les requêtes sont rédigées à l'aide des grilles interprétatives. Tel qu'attendu, l'introduction de la logique floue dans le système permet de raffiner la méthode et d'obtenir des résultats plus justes. Enfin, le SIG présente également l'avantage d'être facile d'utilisation et accessible technologiquement et économiquement.. Des études supplémentaires portant sur d'autres zones où l'on retrouve le cerf pourraient être envisagées afin de valider le modèle.

De plus, l'utilisation de l'imagerie radar dans le processus de classification des différents couverts forestiers s'avère une avenue intéressante. En effet, cette technique permettrait de pallier aux faiblesses de l'imagerie traditionnelle en recueillant des données sur la densité et la hauteur des différents peuplements forestiers. Les différentes études sur le sujet donnent des résultats intéressants; Hyyppä et Hallikainen (1996) estiment un volume à l'hectare avec une précision de 80% et ce avec une image radar dont les pixels ont 400m² de superficie. Le remplacement des cartes écoforestières par l'imagerie radar permettrait une mise à jour rapide, donnant ainsi une dynamique nouvelle au processus. Des recherches semblables pourraient aussi être appliquées à d'autres espèces animales vivant au Québec. Une attention particulière pourrait être donnée aux espèces animales ou végétales en déclin afin de protéger leurs territoires.

10. Références

Aspinall, R. (1992) An inductive modelling procedure based on Bayes' theoren for analysis of pattern in spatial data. International Journal of Geographical Information Systems, vol. 6, no. 2, p. 105-121.

Austin, G.E, Thomas, C.J., Houston, D.C. and Thompson, B.A. (1996) Predicting the spatial distribution of buzzard *Buteo buteo* nesting areas using a geographical information systems and remote sensing. Journal of Applied Ecology, vol. 33, p. 1541-1550.

Banai, R. (1993) Fuzziness in geographical information systems: contributions from the analytic hierarchy process. International Journal of Geographical Information Systems, 1993, vol. 7, no. 4, p. 315-329.

Boer, A.N. (1978) Management of deer wintering area in New-Brunswick. Wildlife Society Bulletin, vol. 6, p. 200-205.

Boroski, B.B., Barrett, R.H., Timossi, I.C. and Kie, J.G. (1996) Modelling habitat suitability for black-tailed deer (*Odocoileus hemionus columbianus*) in heterogeneous landscapes. Forest Ecology and Management, vol. 88, p. 157-165.

Bouchon-Meunier, B. (1994) La logique floue. Presses Universitaires de France, Paris, 128 p.

Burrough, P.A. (1992) Development of intelligent geographical information systems. International Journal Of Geographical Information Systems, vol. 6, no. 1, p. 1-11.

Butler, W.I., Stehn, R.A. and Balogh, G.R. (1995) GIS for mapping waterfowl density and distribution from aerial surveys. Wildlife Society Bulletin, vol. 23, no. 2, p. 140-147.

Collet, C. (1995) Système d'information géographique en mode image. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 186 p.

Congalton, R.G., Stenback, J.M. and Barrett, R.H. (1993) Mapping deer habitat suitability using remote sensing and geographic information systems. Geocarto International, vol. 3, p. 23-33.

Daunicht, W., Salski, A., Nöhr, P. and Neubert, C. (1994) A fuzzy knowledge-based model of annual production of skylarks. Ecological Modelling, vol. 85, p. 67-73.

Davidson, D.A., Theocharopoulos, S.p. and Bloksma, R.S. (1994) A land evaluation projet in Greece using GIS and based on boolean and fuzzy set methodologies. International Journal of Geographical Information Systems, vol. 8, no. 4, p. 369-384.

Dubois, D. and Prade, H. (1980) Fuzzy sets and systems : theory and applications. Academic Press, New_York, 393 p.

Foster, J.R., Roseberry, J.L. and Woolf, A. (1997) Factors influencing efficiency of white-tailed deer Harvest in Illinois. Journal of Wildlife Management, vol. 61, no. 4, p. 1091-1097.

Germain, G., Potvin, F. et Bélanger, L. (1991) Caractérisation des ravages de cerfs de Virginie au Québec. Ministère du Loisir de la Chasse et de la Pêche, Québec, 105 p.

Germain, G. et Potvin, F. (1990) Guide d'amménagement des ravages de cerfs de Virginie. Ministère des Loisirs, de la Chasse et de la Pêche, Québec, 82 p.

Hall, G.B. and Wang, F. (1992) Comparaison of boolean and fuzzy classification methods in land suitability analysis by using geographical information systems. Environment and Planning A, vol. 24, p. 497-516.

Huot, J. (1974) Winter habitat of white-tailed deer at thirty-one miles lake, Quebec. Can. Field-Nat, vol. 88, p. 293-301.

Hyyppä, J. and Hallikainen, M. (1996) Applicability of airborne profiling radar to forest inventory. Remote Sensing Environment, vol. 57, p. 39-57.

Jerabek, V. (1994) Contrôle flou des procédés avec application à la commande des feux de circulation. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 113 p.

Kandel, A. (1991) Fuzzy expert systems. CRC Press, Floride, 316 p.

Kollias, V.J. (dir.) (1991) Fuzzy reasoning in the development of geographical information systems FRSIS : a prototype soil information systems with fuzzy retrieval capabilities. International Journal of Geographical Information Systems, vol. 5, no. 2, p. 209-223.

Larocque, C. (1993) Ravage Duchénier, plans d'intervention 1994-1998. Ministère du Loisir de la Chasse et de la Pêche, Québec, 88 p.

Lessard, M. (1974) Le cerf de Virginie et les méthodes sylvicoles favorisant son aménagement. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, 71 p.

Leung, Y. and Leung, K.S. (1993) An intelligent expert system shell for knowledge based geographical information systems: tools. International Journal of Geographical Information Systems, vol. 7, no. 3, p. 189-199.

Lowell, K. (1994) A fuzzy surface cartographic representation for forestry based on Voronoi diagram area stealing. Canadien Journal of Forest Research, vol. 24, no. 9, p. 1970-1980.

Magio, R.C. (1987) The role of geigraphic information systems in the expert systems. GIS ,87- San Francisco, Second Annual Conference, Exihibits and Workshops on Geographical Information Systems, vol. 2, p. 685-692.

Mladenoff, D .J. and Sickley, T. (1998) Assessing potentiel gray wolf restoration in the Northeastern United States : A spatial prediction of favorable habitat and potential population levels. Journal of Wildlife Management, vol. 62, no. 1, p. 1-10.

Nevo, A. and Garcia, L. (1996) Spatial optimization of wildlife habitat. Ecological Modelling, vol. 91, p. 271-281.

Özesmi, U and Mitsch, W.J. (1997) A spatial habitat model for the marsh-breeding red-winged blackbird (*Agelaius phoeniceus* L.) in coastal Lake Eric wetlands. Ecological Modelling, vol. 101, p.139-152.

Robitaille, A. et Grondin, P. (1992) Guide d'utilisation des produits de la cartographie des districts écologiques. Ministère des Forêts. Québec, 69 p.

Rushton, S.P., Lurz, P.W.W., Fuller, R. and Garson, P.J. (1997) Modelling the distribution of the red and grey squirrel at the landscape scale : a combined GIS and population dynamics approach. Journal of Applied Ecology, vol. 34, p. 1137-1154.

Sirois, J. (1986) Évaluation des données Landsat thematic Mapper pour l'analyse de l'habitat d'hiver du cerf de Virginie dans le sud-est du Québec. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, 48 p.

Skidmore, A.K. and Walker, P. (1996) Classification of kangaroo habitat distribution using three GIS models. International Journal of Geographical Information System, vol. 10, no. 4, p. 441-454.

Terano, T. (1987) Fuzzy systems theory and its applications. Academic press, Boston, 268 p.

Weber, S.J., Maute, W.W., Lanier, J.W. and Wiley, J.E. (1983) Predictive equations for deer yards in northern New-Hamphshire. Wildlife Society Bulletin, vol, 11, no 4, p. 331-338.

ANNEXE 1
Le cerf de Virginie

LE CERF DE VIRGINIE
(*Odocoilus virginianus*)

Longueur totale : 160 à 215 cm
Poids : mâle adulte : 85 à 170 kg
Femelle : 57 à 113 kg (Prescott et Richard, 1982).

Le cerf de Virginie est une espèce capable de s'adapter à des environnements très diversifiés. Son aire de distribution est d'ailleurs très vaste allant du sud du Canada jusqu'en Amérique du Sud. Il fréquente les champs abandonnés, les vergers, les zones de repousse et les éclaircies de la forêt de feuillus et de la forêt mixte. Il se nourrit alors des feuilles et des ramilles d'une grande variété de plantes herbacées, d'arbres et d'arbustes, de même que de fruits et de champignons (Prescott et Richard, 1982). Dans la partie nordique de son aire de distribution, le cerf effectue une migration hivernale qui l'amène à se concentrer dans une zone de ravage. Ils tracent dans ces zones un réseau de sentiers qui relie les couverts d'abri et les couverts de nourriture. La température et surtout la quantité de neige au sol sont considérées comme les principaux facteurs initiant cette migration (Germain et Potvin, 1991).

Ainsi, la quantité de nourriture additionnelle requise au cerf a été calculée lorsque les conditions de température et d'épaisseur de neige deviennent plus difficile. La figure 1 montre l'effet de la température sur la biomasse journalière nécessaire au cerf pour se maintenir et lutter contre le froid sans aucune autre activité de sa part. On note que les besoins augmentent lentement et qu'ils deviennent plus importants lorsque la température est sous les – 8 °C. La figure 2 montre l'effet de l'épaisseur de la neige au sol sur la biomasse que doit absorber le cerf pour compenser la difficulté du déplacement. On constate qu'à partir de 50 cm, la dépense d'énergie augmente rapidement (Germain et Potvin, 1990).

C'est pourquoi, on retrouve généralement les ravages dans des peuplements comportant une forte proportion de conifères mûrs de structure équienne. Ces peuplements assurent une bonne protection thermique (vent), interceptent la neige lors des précipitations et

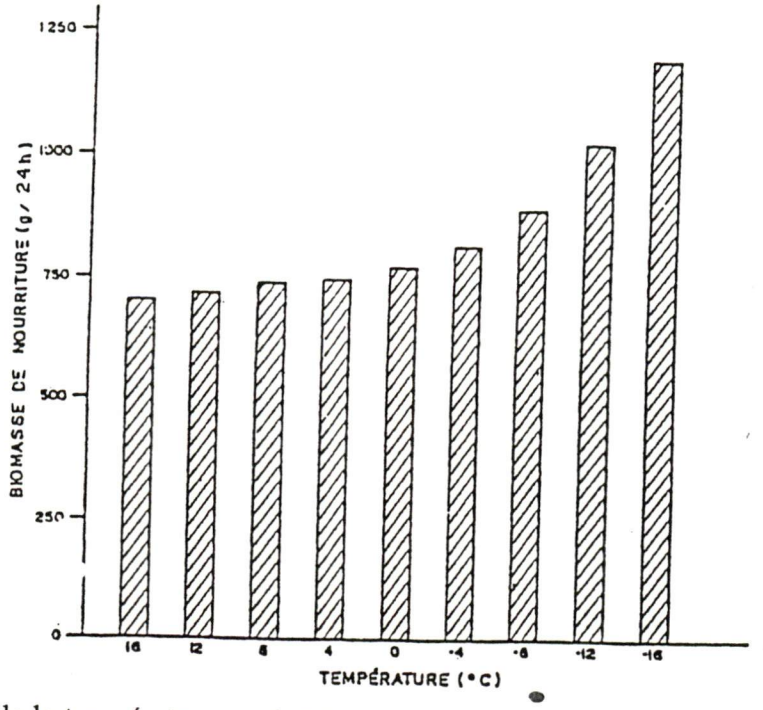


Figure 1 : Effet de la température sur la biomasse journalière du Cerf pour se maintenir et lutter contre le froid. Tiré de Germain et Potvin, (1990, p.11)

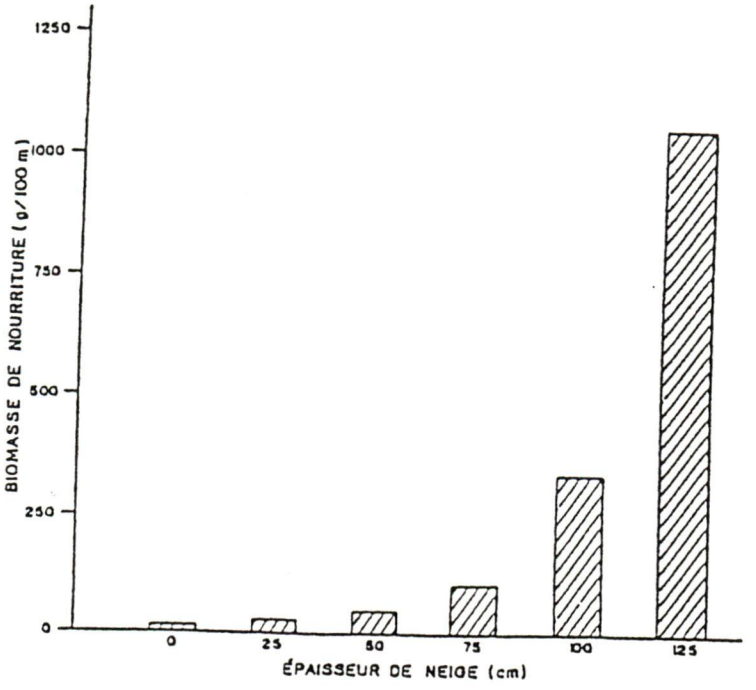


Figure 2 : Effet de l'épaisseur de la neige au sol sur la biomasse de nourriture que doit absorber le cerf. Tiré de Germain et Potvin (1990, p. 11).

assurent une meilleure compacité de la neige favorisant le déplacement (Germain et Potvin, 1990). On peut constater cette affirmation sur la figure 3 qui montre l'effet du vent sur quatre situations de couvert forestier. On constate qu'effectivement, un peuplement résineux dense de structure équienne empêche la presque totalité du vent d'atteindre le sol offrant ainsi au cerf un abri de qualité. À noter qu'entre un territoire bien pourvu en nourriture mais offrant des conditions climatiques difficiles et un autre assurant des conditions climatiques moins rigoureuses le cerf choisira le site possédant le meilleur climat afin de ralentir l'utilisation de ses réserves corporelles et de subsister le plus longtemps possible (Germain et Potvin, 1990).

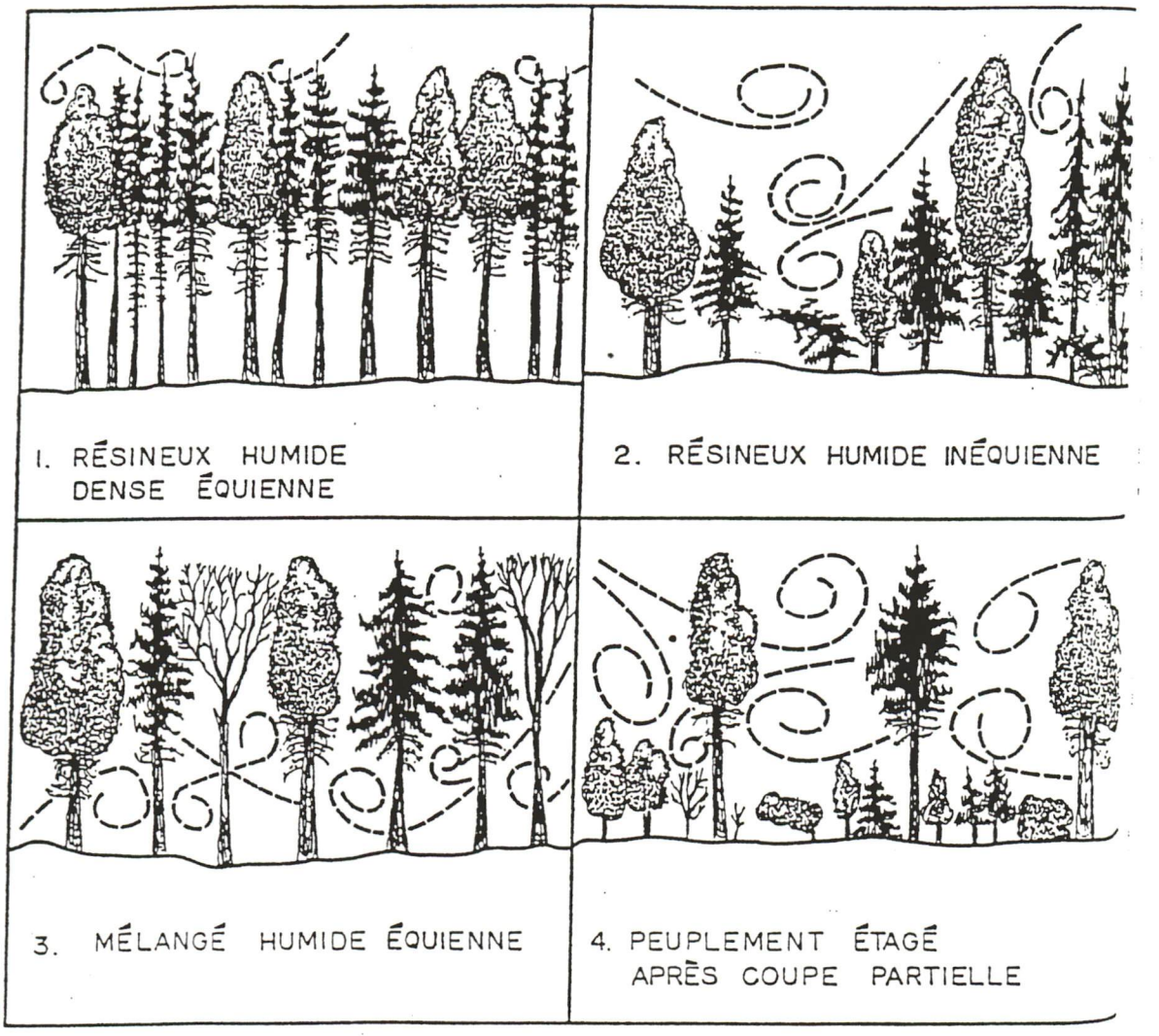


Figure 3 : Effet du couvert forestier sur le vent, tiré de Germain et Potvin (1990, p. 12).

Références :

Germain, G., Potvin, F. et Bélanger, L. (1991) Caractérisation des ravages de cerfs de Virginie au Québec. Ministère du Loisir de la Chasse et de la Pêche, Québec, 105 p.

Germain, G. et Potvin, F. (1990) Guide d'aménagement des ravages de cerfs de Virginie. Ministère des Loisirs, de la Chasse et de la Pêche, Québec, 82 p.

Prescott, J., Richard, P. (1982) Mammifères du Québec et de l'est du Canada. Édition France-Amérique, Montréal, 430 p.

ANNEXE 2
La logique floue

Table des matières

1. Ensembles classiques 51
2. Définition des ensembles flous 52
3. Caractéristiques des ensembles flous 54
4. Opération sur les ensembles flous 55
4.1. Égalité, inclusion des sous-ensembles flous 55
4.2. Intersection 55
4.3. Union 56
4.4. Complément des ensembles flous 57
4.5. Autres propriétés des ensembles flous 59
5. Les fonctions d'appartenance 60
5.1. Codage d'une fonction d'appartenance discrète 60
5.2. Codage d'une fonction d'appartenance continue 61

LES ENSEMBLES FLOUS

1. Ensembles classiques

Selon la théorie classique des ensembles un élément appartient à une classe ou n'y appartient pas. Ce qui signifie qu'un sous-ensemble classique A de X est défini par une fonction caractéristique χ_A qui prend la valeur 1 pour les éléments de X qui appartiennent à A et la valeur 0 pour ceux qui n'appartiennent pas à A (Bouchon-Meunier, 1994).

$$\chi_A: X \rightarrow \{0,1\} \qquad (1)$$

Cette définition ne laisse aucune place à l'ambiguïté ou à l'imprécision. Par le fait même, les résultats des opérations mathématiques (complément, intersection, union) entre deux ensembles classiques sont très précis (Figure 1).

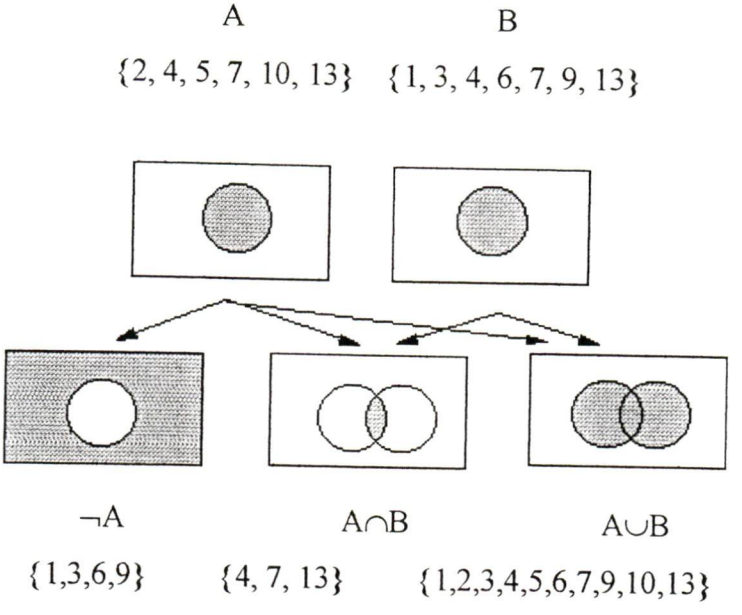


Figure 1: Opération avec des ensembles classiques

Par contre, ces résultats représentent une division artificielle de caractère noir et blanc qui ne s'applique pas à la majorité des paramètres du monde réel qui est imprécis et vague (Jerabek, 1994).

2. Définition des ensembles flous

Contrairement aux ensembles classiques, les ensembles flous permettent de représenter et de manipuler une information imprécise et vague d'une manière similaire à ce que l'homme fait (Dubois et Prade, 1980). Avant d'introduire le concept d'ensemble flou, il faut d'abord éclaircir la notion d'appartenance à un ensemble, appartenance dont le degré peut varier entre l'exclusion absolue 0 et l'appartenance absolue 1. Selon la théorie des ensembles classiques, on retrouve seulement deux degrés d'appartenance à un ensemble soit 0 et 1. Par contre, le degré d'appartenance à un ensemble flou permet de définir une gradation dans l'appartenance d'un élément à cet ensemble. Ce concept d'appartenance variable rend possible la représentation d'information imprécise ou de catégories mal définies.

Un sous-ensemble flou A de X est donc défini par une fonction d'appartenance qui associe à chaque élément x de X, le degré $f_A(x)$ compris entre 0 et 1 avec lequel x appartient à A (Bouchon- Meunier, 1994).

$$f_A: X \rightarrow [0,1] \qquad (2)$$

Le sous-ensemble flou A est un sous-ensemble classique de X dans le cas particulier où f_A ne prend que des valeurs égales à 0 ou 1 (Bouchon-Meunier, 1994)

L'observation de la vitesse d'une voiture permet de démontrer la différence entre un ensemble classique et un ensemble flou. La vitesse est définie par l'intervalle fermé [0,100] km/h. Supposons que la vitesse d'intérêt est approximativement 60 km/h qui se trouve dans l'intervalle fermée [50,70] km/h. Le degré d'appartenance d'un ensemble classique prend les valeurs $x_{\text{vitesse}} = 0$ si la vitesse se trouve n'importe où à l'extérieur de l'intervalle [50,70] km/h et prend la valeur $x_{\text{vitesse}} = 1$ lorsque la vitesse se trouve à l'intérieur de l'intervalle mentionné (Figure 2).

Pour un ensemble flou la fonction d'appartenance change graduellement en s'approchant de la valeur exacte de 60 km/h. Autrement dit, le degré d'appartenance devient de plus en plus élevé quand la vitesse s'approche de 60km/h (figure 3).

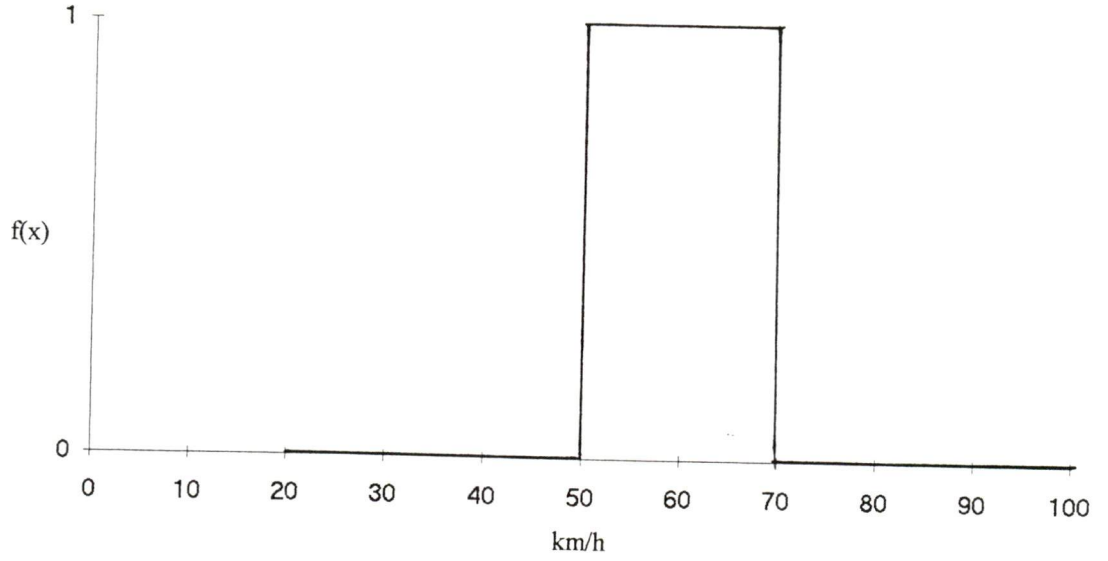


Figure 2: Ensemble classique [50,70] km/h

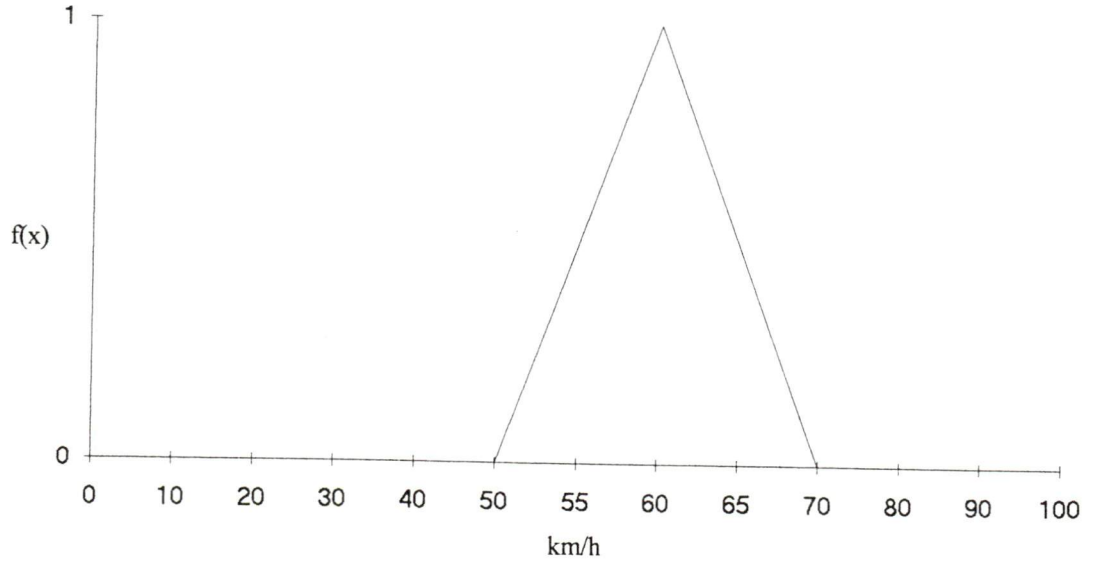


Figure 3: Ensemble flou [50,70] km/h

3. Caractéristiques des ensembles flous

Afin de décrire facilement un sous-ensemble flou A de X, on utilise certaines de ses caractéristiques, essentiellement celles qui montrent dans quelle mesure il diffère d'un sous-ensemble classique de X (Bouchon-Meunier, 1994).

La première de ces caractéristiques est le support de A c'est-à-dire l'ensemble des éléments de X qui appartiennent au moins un peu à A. Il est noté supp (A) et c'est la partie de X sur laquelle la fonction d'appartenance de A n'est pas nulle:

$$\text{supp}(A) = \{ x \in X / f_A(x) \neq 0 \} \tag{3}$$

La deuxième caractéristique de A est sa hauteur notée $h(A)$ c'est-à-dire, le plus fort degré avec lequel un élément de X appartient à A. C'est la plus grande valeur prise par sa fonction d'appartenance:

$$h(A) = \text{supp}_{x \in X} f_A(x) \tag{4}$$

La troisième caractéristique importante de A est l'ensemble de tous les éléments appartenant de façon absolue ($f_A(x)=1$) à A. Elle est appelée le noyau de A et noté noy(A):

$$\text{noy}(A) = \{ x \in X / f_A(x)=1 \} \tag{5}$$

Finalement la dernière caractéristique du sous-ensemble flou A de X (lorsque X est fini) est sa cardinalité, évaluant le degré global avec lequel les éléments de X appartiennent à A. Elle est définie par:

$$|A| = \Sigma_{x \in X} f_A(x) \tag{6}$$

Exemple 1: Soit X= (Sherbrooke, campagne, village) l'ensemble des lieux proposés pour une habitation, noté S, C, V. On peut définir le sous-ensemble flou suivant:
A= 0,8/S+0/C+1/V
où supp(A) = {S,V}, h(A) =1, noy(A) = {V} et |A| = 1,8.

4. Opérations sur les ensembles flous

Tout comme pour les ensembles classiques, différentes opérations mathématiques s'appliquent aux ensembles flous. En fait, les opérations mathématiques entre les ensembles flous sont essentiellement des généralisations des opérations entre des ensembles classiques (Jerabek, 1994). C'est pourquoi les notions d'union, d'intersection, d'inclusion et de complément de sous-ensembles flous sont utiles.

4.1. Égalité, inclusion de sous-ensembles flous

Deux sous-ensembles flous A et B d'un même ensemble X sont égaux si leurs fonctions d'appartenance prennent la même valeur en tout point de X.

$$\forall x \in X \qquad f_A(x) = f_B(x) \tag{7}$$

On dit que A $\in$ F(x) est inclus dans B $\in$ F(x), A$\subseteq$B, si tout élément x de X qui appartient à A appartient aussi à B avec un degré au moins aussi grand. Leurs fonctions d'appartenance sont telles que:

$$\forall x \in X \qquad f_A(x) \leq f_B(x) \tag{8}$$

4.2. Intersection

L'intersection de deux sous-ensembles flous A et B de X est le sous-ensemble flou constitué des éléments de X affectés du plus petit de leurs deux degrés d'appartenance, donnés par f_A et f_B. Elle est définie comme l'élément C=A$\cap$B de F(X) tel que:

$$\forall x \in X \qquad f_C(x) = \min(f_A(x), f_B(x)) \tag{9}$$

où min désigne minimiser.

Exemple 2: Définissons deux ensembles flous A et B par f_A=[0/1, 0,3/2, 0,8/3, 1,0/4] et f_B=[0,1/1, 0,6/2, 1,0/3, 0,5/4]. L'intersection de ces deux ensembles flous est $f_{A \cap B}$=[0/1, 0,3/2, 0,8/3, 0,5/4] (Figure 4).

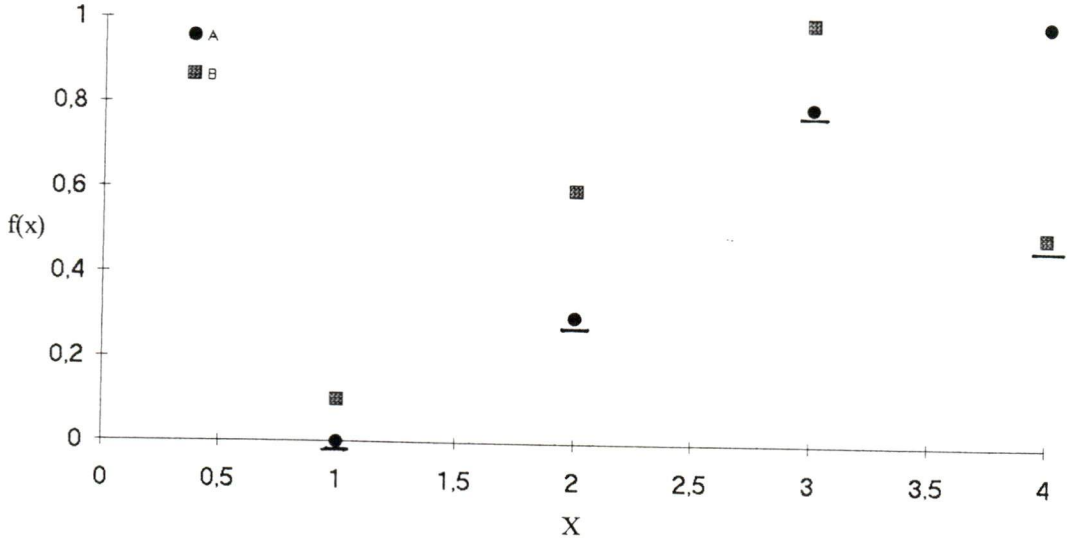


Figure 4: Intersection de deux ensembles flous

4.3. Union

L'union de deux sous-ensembles flous A et B de X est le sous-ensemble flou constitué des éléments de X affectés du plus grand de leurs deux degrés d'appartenance, donnés par f_A et f_B. Elle est définie comme l'élément D=A∪B de F(X) tel que:

$$\forall x \in X \qquad f_D(x) = \max(f_A(x), f_B(x)) \tag{10}$$

où max désigne maximiser.

Exemple 3: Illustrons l'union des deux ensembles A et B décrits dans la section 4.2 où f_A =[0/1, 0,3/2, 0,8/3, 1,0/4] et f_B =[0,1/1, 0,6/2, 1,0/3, 0,5/4]. L'union des deux ensembles est $f_{A\cup B}$=[0,1/1, 0,6/2, 1,0/3, 1,0/4] (Figure 5).

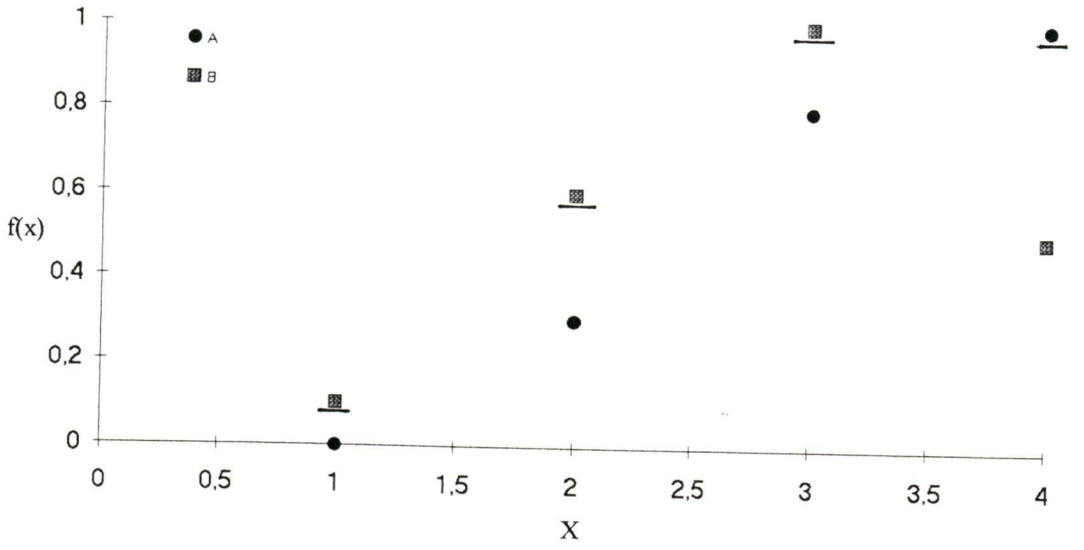


Figure 5 : Union de deux ensembles flous

4.4. Complément d'ensemble flou

On définit le complément A^c d'un élément A de F(X) en considérant qu'un élément x de X appartient d'autant plus à A^c qu'il appartient peu à A. Il est défini comme le sous-ensemble flou de X de fonction d'appartenance:

$$\forall x \in X \qquad f_A(x) = 1 - f_A(x) \tag{11}$$

Exemple 1.4: Illustrons le complément de l'ensemble A où f_A=[0/1, 0,3/2, 0,8/3, 1,0/4]. Le complément de A est $f_A{}^c$= [1,0/1, 0,7/2, 0,2/3, 0/4]. (Figure 6)

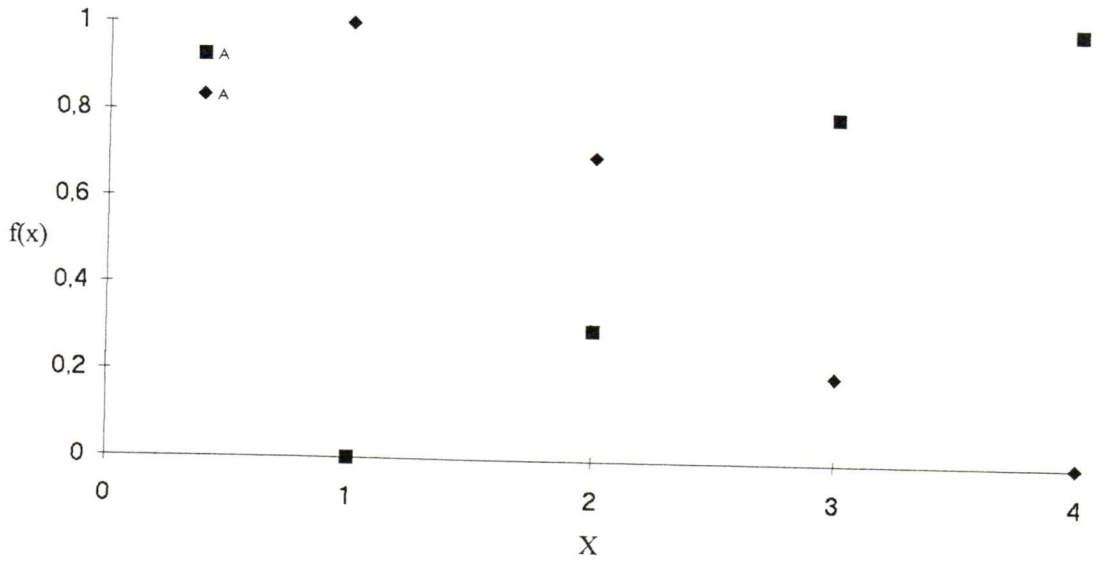


Figure 6: Complément d'un ensemble flou

4.5. Autres propriétés des ensembles flous

Comme dans la théorie des ensembles classiques, les définitions de l'union, l'intersection et du complément conduisent aux propriétés suivantes: (Dubois, 1980)

Commutativité

$$A \cap B = B \cap A \quad (12)$$

$$A \cup B = B \cup A \quad (13)$$

Associativité

$$A \cup (B \cup C) = (A \cup B) \cup C \quad (14)$$

$$A \cap (B \cap C) = (A \cap B) \cap C \quad (15)$$

Loi de Morgan

$$\neg(A \cap B) = \neg A \cap \neg B \quad (16)$$

$$\neg(A \cup B) = \neg A \cup \neg B \quad (17)$$

Loi d'identité

$$A \cup \varnothing = A \quad (18)$$

$$A \cap X = A \quad (19)$$

Loi d'absorption

$$A \cap \varnothing = \varnothing \quad (20)$$

$$A \cup X = X \quad (21)$$

Loi de distribution

$$A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C) \quad (22)$$

$$A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C) \quad (23)$$

5. Les fonctions d'appartenance

En logique floue, une fonction d'appartenance peut-être définie de façon discrète ou continue (Jerabek, 1994). Les formes standards de représentation d'une fonction d'appartenance sont représentées dans les sections qui suivent.

5.1. Codage d'une fonction d'appartenance discrète

Le degré d'appartenance du codage discret est représenté par un vecteur dont la longueur varie selon le taux d'appartenance. La fonction d'appartenance prend la forme:

$$f_{(x)} = \Sigma^{i} \, fun_i / x_i \tag{24}$$

$$fun = (p_1, p_2, p_3, \ldots, p_n) \tag{25}$$

ou $p_1, p_2, p_3, \ldots, p_n$ sont les taux d'appartenance.

Exemple 5: Le degré d'appartenance peut-être représenté par un vecteur $f_{(x)}$ =(0,2/5, 0,4/6, 0,6/7, 1,0/8) illustré à la figure 7.

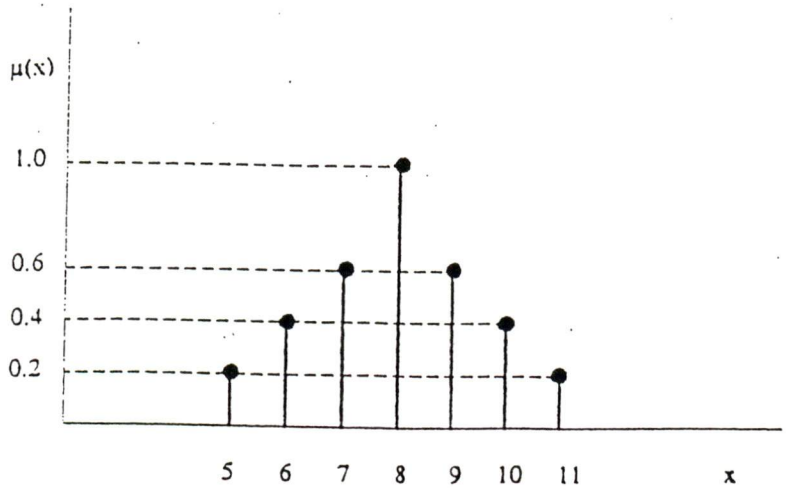


Figure 7: Exemple de codage discret, tiré de Jerabek (1994, p.51)

5.2 Codage d'une fonction d'appartenance continue

C'est le codage le plus utilisé. Les fonctions d'appartenance sont présentées selon une forme continue soit comme des triangles, des trapèzes, des fonctions gaussiennes ou d'autres formes.

La fonction d'appartenance gaussienne s'écrit de la façon suivante (Terano, 1987):

$$f_{(x)} = e^{-k*(x-a)^2} \tag{26}$$

où "a "est le centre de la fonction d'appartenance et la constante "k" gère la forme. (Figure 8)

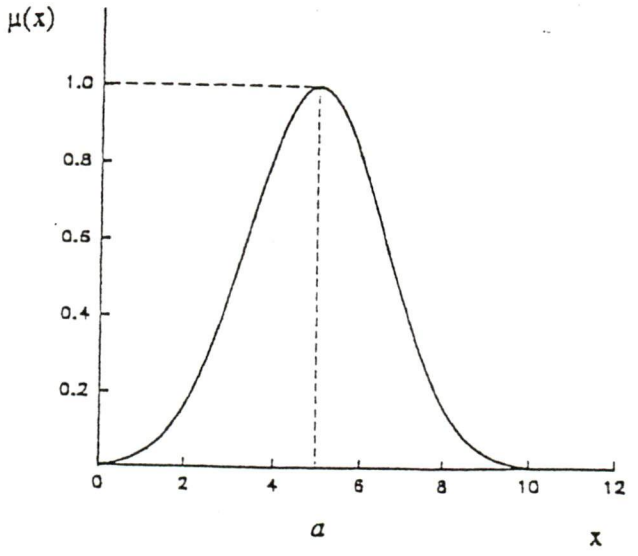


Figure 8 : Exemple d'une fonction gaussienne, tiré de Jerabek (1994, p.52)

La fonction d'appartenance triangulaire tant qu'à elle prend la forme suivante (Terano, 1987).

$$f(\mathrm{x}) = \begin{cases} \dfrac{(x-a_1)}{(a-a_1)} & \text{pour } a_1 \le x \langle a \\ \dfrac{(x-a_2)}{(a-a_2)} & \text{pour } a \langle x \le a_2 \end{cases} \qquad (27)$$

où a_1 est le début, a est le centre et a_2 est la fin de la fonction d'appartenance. (Figure 2.3)

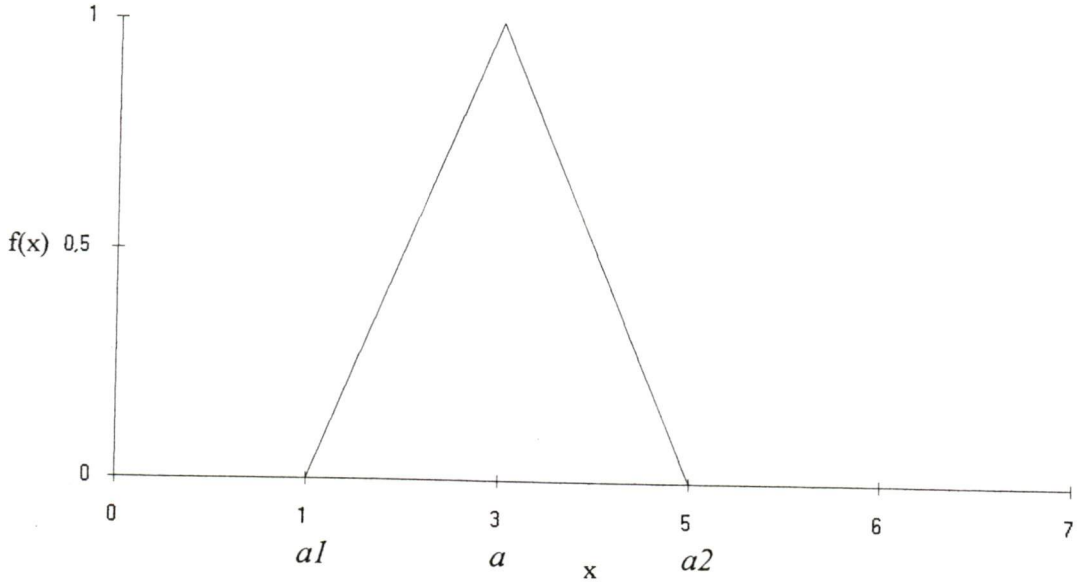


Figure 9: Fonction d'appartenance triangulaire

Finalement, un cas spécial de la fonction d'appartenance triangulaire est la fonction trapézoïde qui utilise la formule suivante. (Figure 10)

$$f(\mathrm{x}) = \begin{cases} \dfrac{(x-a_1)}{(a_2-a_1)} & \text{pour } a_1 \le x < a_2 \\ 1 & \text{pour } a_1 < x \le a_3 \\ \dfrac{(x-a_4)}{(a_3-a_4)} & \text{pour } a_3 < x \le a_4 \end{cases} \qquad (28)$$

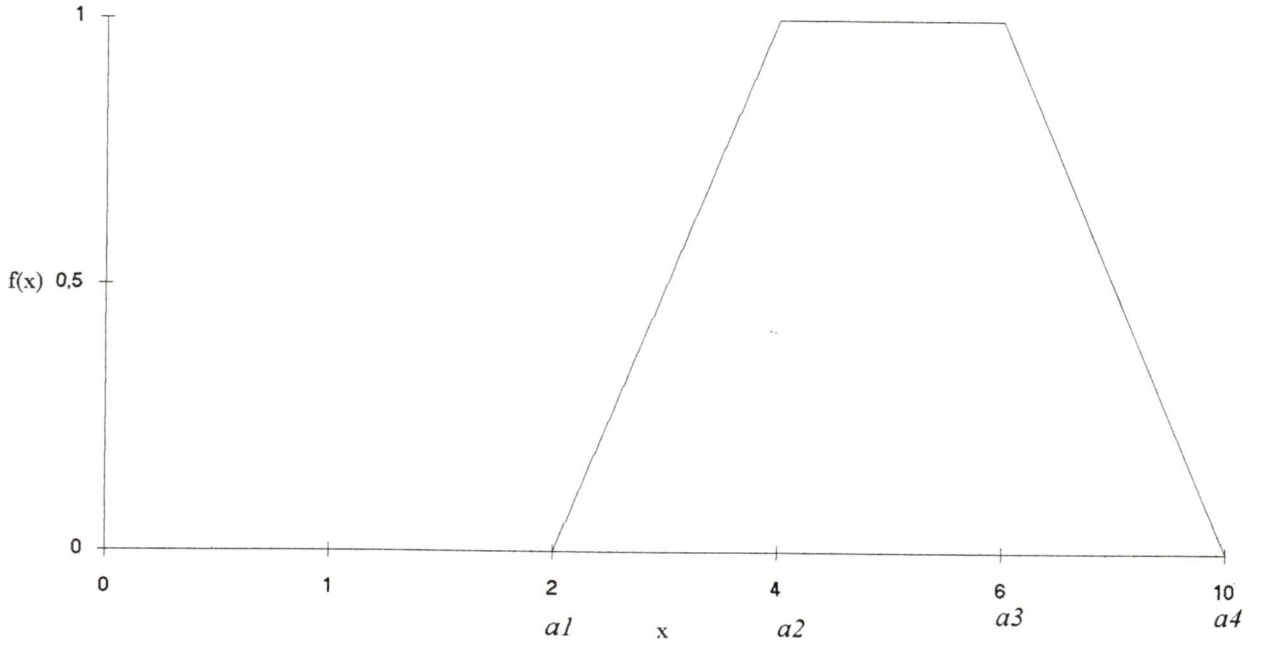


Figure 10: Fonction d'appartenance trapézoïde

Références

Bouchon-Meunier, B. (1994) La logique floue. Presses Universitaires de France, Paris, 128 p.

Dubois, D., Prade, H. (1980) Fuzzy sets and systems :theory and applications. Academic Press, New-York, 393 p.

Jerabek, V. (1994) Contrôle flou des procédés avec application à la commande des feux de circulations. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 113 p.

Terano, T. (1987) Fuzzy systems theory and its applications. Academic press, Boston, 268 p.