Télédétection, 2005, vol. 4, n°4, p. 303-328
Droit de photocopie soumis à l'autorisation

© 2005 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions scientifiques GB*

MÉTHODE DE CARTOGRAPHIE DES GÉORISQUES KARSTIQUES À L'AIDE D'UNE IMAGE RADAR : APPLICATION À L'ÎLE D'ANTICOSTI, QUÉBEC

GUILLAUME PARÉ[1,a], JEAN-MARIE M. DUBOIS[1,b] ET Q.H.J. GWYN[2,c]

[1] CARTEL (Centre d'applications et de recherches en télédétection) et Département de géographie et télédétection, Université de Sherbrooke, Québec, Canada J1K 2R1
Téléphone : 819-821-7181 ; télécopieur : 819-821-7944

[2] INFOTIERRA inc., 150, rue de Vimy, Sherbrooke, Québec J1J 3M7
Téléphone : 819-346-6622, poste 222 ; télécopieur : 819-346-4331

Courriels [(a,b,c)] : pare_guillaume@yahoo.ca ; jean-marie.dubois@USherbrooke.ca ; gwyn@infotierra.com

(soumis : 23 octobre 2003 ; révisé : 3 mars 2004 ; accepté 12 octobre 2004)

Les environnements calcaires occupent une partie importante de la surface des continents, soit environ 10 %. La fragilité et l'évolution rapide de ces formations géologiques constituent un risque naturel qui justifie l'évaluation de divers outils de reconnaissance et d'analyse du karst. Le but du projet est tant de vérifier la capacité d'un radar imageur à cartographier le niveau d'intensité de karstification que de développer une méthode simple de cartographie de ce géorisque. La réalité de terrain, faite à partir de la photointerprétation au 1 : 40 000 du site d'étude, est utilisée pour comparer les résultats de la cartographie du karst provenant du traitement d'une image radar aéroportée (SAR-580). Comme données, on a utilisé conjointement le nombre de dépressions topographiques et leur superficie, tout en tenant compte de nombreuses dépressions obstruées par des sédiments glaciaires et nombre de dolines ennoyées. Les données sont analysées à l'aide d'une grille dont la dimension des mailles est calculée à l'aide de la superficie de la zone d'étude, du nombre de dépressions et de leur superficie. Sur l'image radar, les plans d'eau sont aisément identifiables, étant de bons réflecteurs spéculaires. Les tourbières, qui agissent comme des réflecteurs semi-spéculaires, et les dolines isolées, à cause de leur petite dimension, sont plus difficiles à discerner des zones de faible rétrodiffusion topographique situées dans la forêt environnante. C'est cette situation qui explique le choix de la méthode de classification dans laquelle on utilise l'image filtrée du chatoiement et une analyse de texture. L'angle d'incidence trop élevé du capteur (43° à 83°) a occasionné des zones d'ombre radar qui se confondent avec les plans d'eau et qui sont ainsi classées comme étant des dépressions karstiques. Cependant, les résultats démontrent qu'une majorité de cellules de la carte d'intensité karstique provenant de l'image radar ont un niveau similaire d'intensité à celui de la carte provenant de la photointerprétation.

Mots-clefs : karst ; risques naturels ; image radar ; géomorphologie ; analyse spatiale.

MAPPING METHODOLOGY OF KARST GEOHAZARDS USING RADAR IMAGES: ANTICOSTI ISLAND, QUÉBEC

A significant proportion (10 %) of the Earth surface is composed of limestone, a geological formation susceptible to rapid evolution. The evaluation of tools to recognise and analyse karst is therefore justified. The ability of imaging radar to measure the intensity of karstification is of particular interest in this study. A method for mapping this geohazard has been developed. Interpretation of aerial photographs, representing the reality on the ground was compared with airborne radar images (SAR-580). The data used are the number and area of depressions. We have also included depressions blocked by glacial sediments. The images were analysed using a grid whose size is calculated based on the total number and the area of depressions. While water surfaces, being good specular reflectors, are easily spotted, pet bogs, acting as semi-specular reflectors, and small sinkholes were often confused with zones of low topographic backscatter present in the surrounding forest. The choice of the method of classification using a speckle-free image and texture analysis was therefore applied. The low incidence angle of the sensor created some significant shadow areas which were typically classified as water because both classes had similar numerical values. However, the results show that a majority of the cells of the karst intensity map based on the radar image have a similar level of karst intensity as those based on airphoto interpretations.

Keywords : karst; geohazards; radar imagery; geomorphology; spatial analysis.

1. INTRODUCTION

L'altération chimique par les eaux de pluie attaque les roches, à différents degrés, particulièrement les roches carbonatées. Chargée d'acide carbonique et le gel aidant, l'eau agrandit les fissures par dissolution (Sweeting, 1972). Ce processus mène à la formation de cavités et d'un réseau de drainage souterrain. En surface, le processus de dissolution favorise la mise en place de dépressions, principalement des dolines, ce qui se traduit par une géomorphologie accidentée.

La formation d'un karst a pour conséquence de rendre le substratum rocheux instable. De plus, la topographie du terrain peut évoluer rapidement. Il y a donc un géorisque associé aux karsts. Beck (1988) résume ainsi les problèmes environnementaux et d'ingénierie qui leur sont reliés :

– effondrement soudain ou graduel de la surface du terrain ;

– pollution de l'aquifère causée par l'infiltration dans le sol des cours d'eau ;

– pollution de l'aquifère causée par la rupture soudaine de retenues d'eau ;

– conditions irrégulières et imprévisibles, liées au processus d'érosion de la zone épikarstique, affectant les fondations des bâtiments ou des infrastructures ;

– inondation de bassins karstiques lorsque l'infiltration naturelle est bloquée.

White (1988) a estimé que les karsts couvraient 50 000 000 km² de la surface terrestre, ce qui représenterait plus de 20 % de la surface des terres émergées. Par contre, si on ne considère que les zones avec un réseau hydrique souterrain significatif, cette surface serait plutôt d'environ 10 % (Ford and Williams, 1989). C'est donc un phénomène à prendre sérieusement en compte.

Malgré l'importance des phénomènes karstiques, on n'a recensé que trois méthodes de cartographie de ce géorisque.

La première méthode, celle de Brook et Allison (1983), est fondée sur le nombre de dolines à l'intérieur des cellules d'une grille. Ces auteurs ont utilisé des cellules de 1,0 × 1,1 km où, à chacune des cellules, on donne un des quatre niveaux de densité qui correspond au nombre de dolines par cellule. Malheureusement, la façon de procéder y est mal expliquée. Le choix de la dimension des cellules semble être le résultat de la division du terrain en rangées et en colonnes qui approchent le plus de 1 km de côté. Pour évaluer la densité des cellules, les auteurs se sont contentés de diviser la densité maximale par le nombre de classes voulues. Adams et Lovell (1984) ont utilisé le même principe, mais en se bornant à déterminer le nombre de dolines par mi.² (2,59 km²).

La deuxième méthode, celle de Wilson et Beck (1988), est basée sur des cartes d'isodensité. Ces auteurs se servent de la densité de dolines par 10 mi.² (25,9 km²) pour tracer une carte de fréquence ces formes. Cette méthode est basée sur les travaux de Upchurch et Littlefield (1987), qui ont utilisé la mesure de la distance entre les dolines pour créer leurs cartes d'isodensité.

La troisième méthode est celle de Forth *et al.* (1997). Ces auteurs ont utilisé plusieurs données de terrain (type de roche, fractures, pente, *etc.*), auxquelles ils ont donné une pondération, pour faire ressortir les zones à risque.

Ces techniques ont en commun les lacunes suivantes : peu d'explications pour décrire les étapes du processus et peu de justifications des critères utilisés et de la valeur statistique de ces données. Le lecteur qui désire répéter l'opération est laissé à lui-même, problème d'autant plus important si le contexte du terrain diffère de celui dans lequel se trouvait celui des auteurs des techniques mentionnées. Tous ces problèmes nous ont incités à établir notre propre méthode de cartographie des géorisques karstiques qui pourrait être applicable à d'autres régions.

Nous avons aussi décidé d'établir cette cartographie à partir du traitement d'images radar qui nous semblent appropriées à cette fin pour trois raisons : *1)* une étude basée sur des données numériques permet plus facilement la répétitivité de la méthode de façon uniforme, *2)* l'onde radar est très sensible à la rugosité et à la topographie du terrain, ce qui devrait permettre de bien cartographier les dépressions et *3)* la région d'application est régulièrement affectée par une couverture nuageuse, ce que l'image radar fait abstraction (Paré, 2000).

L'étude du karst à l'aide d'images radar est un sujet qui n'a pas souvent été abordé. Il semble que les premiers à avoir traité directement de ce sujet sont Smith et Tribbe (1979), qui ont fait une analyse sommaire de l'utilisation du radar aéroporté pour l'étude de la topographie karstique. Leur article fait ressortir le potentiel du radar imageur en tant qu'outil pouvant caractériser la géomorphologie karstique. Cette idée a été reprise plus tard dans une étude sur la cartographie des formations karstiques avec des données radar multifréquences (Nezry *et al.*, 1993). On y a fait remarquer la complémentarité de la bande C, qui fait bien ressortir les éléments lithologiques, avec la bande X, qui aide à identifier l'information sur l'utilisation du territoire.

Puisque aucune méthode standard n'a encore été proposée pour effectuer la cartographie des géorisques karstiques, nous voulons donc établir une méthode qui soit applicable dans le cadre de la présente zone d'étude, mais qu'elle puisse aussi servir ailleurs, dans des régions où le niveau de karstification est différent. De plus, nous voulons déterminer s'il est possible de cartographier la majorité des dépressions karstiques de surface à l'aide d'une image radar, ici une image à partir d'un capteur aéroporté.

2. DESCRIPTION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Le plateau central de l'île d'Anticosti, localisée dans le golfe du Saint-Laurent, est une des plus vastes régions karstiques du sud du Québec (figure 1). Le karst couvre toute la partie centrale de l'île, entre 49° et 50° de latitude nord et 63° et 64° de longitude ouest, soit une superficie de plus de 2 000 km ². Le site d'étude est localisé dans la partie nord-est de ce karst (figure 2).

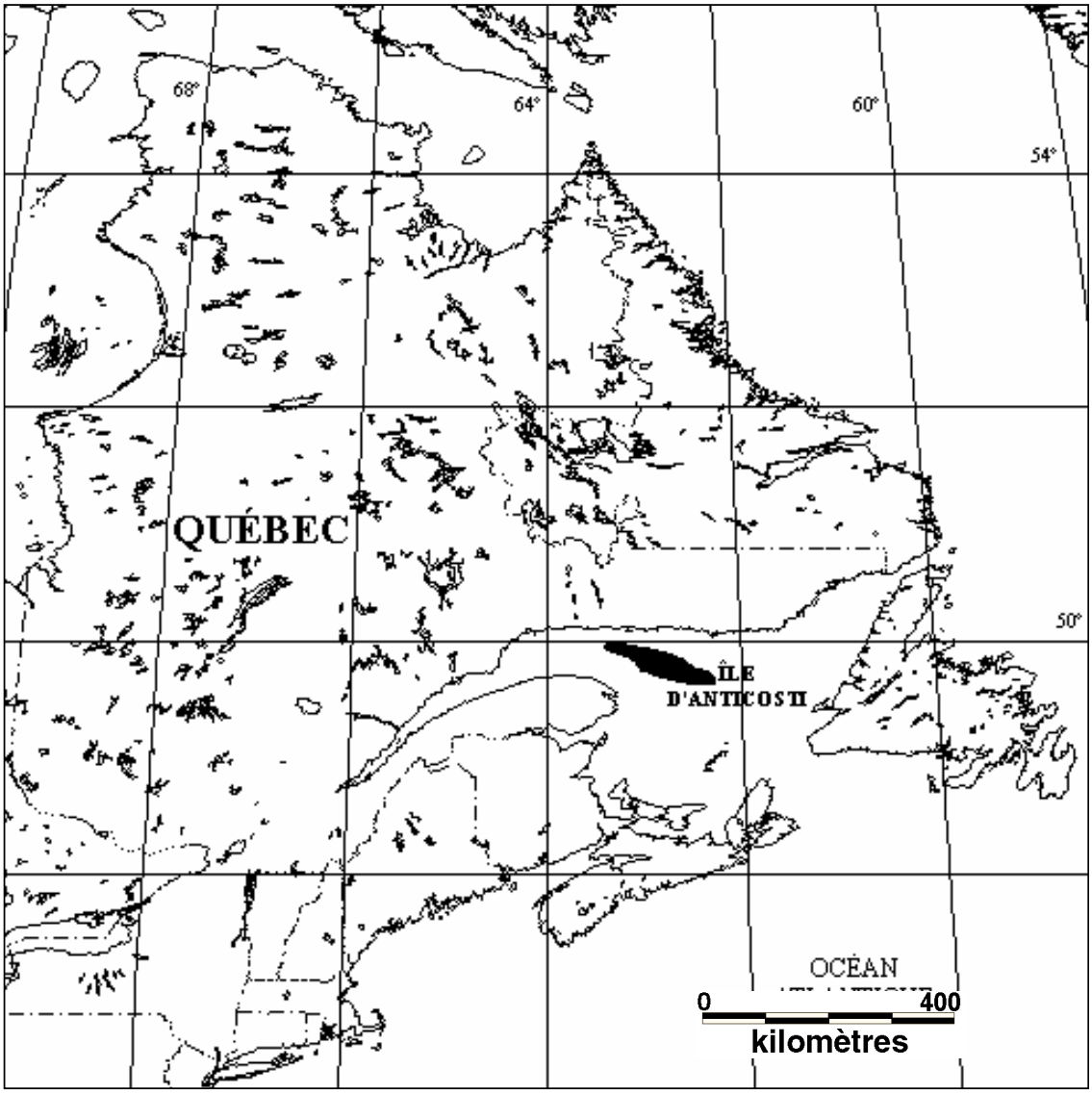


FIGURE 1 Localisation de l'île d'Anticosti. *Location of Anticosti Island*.

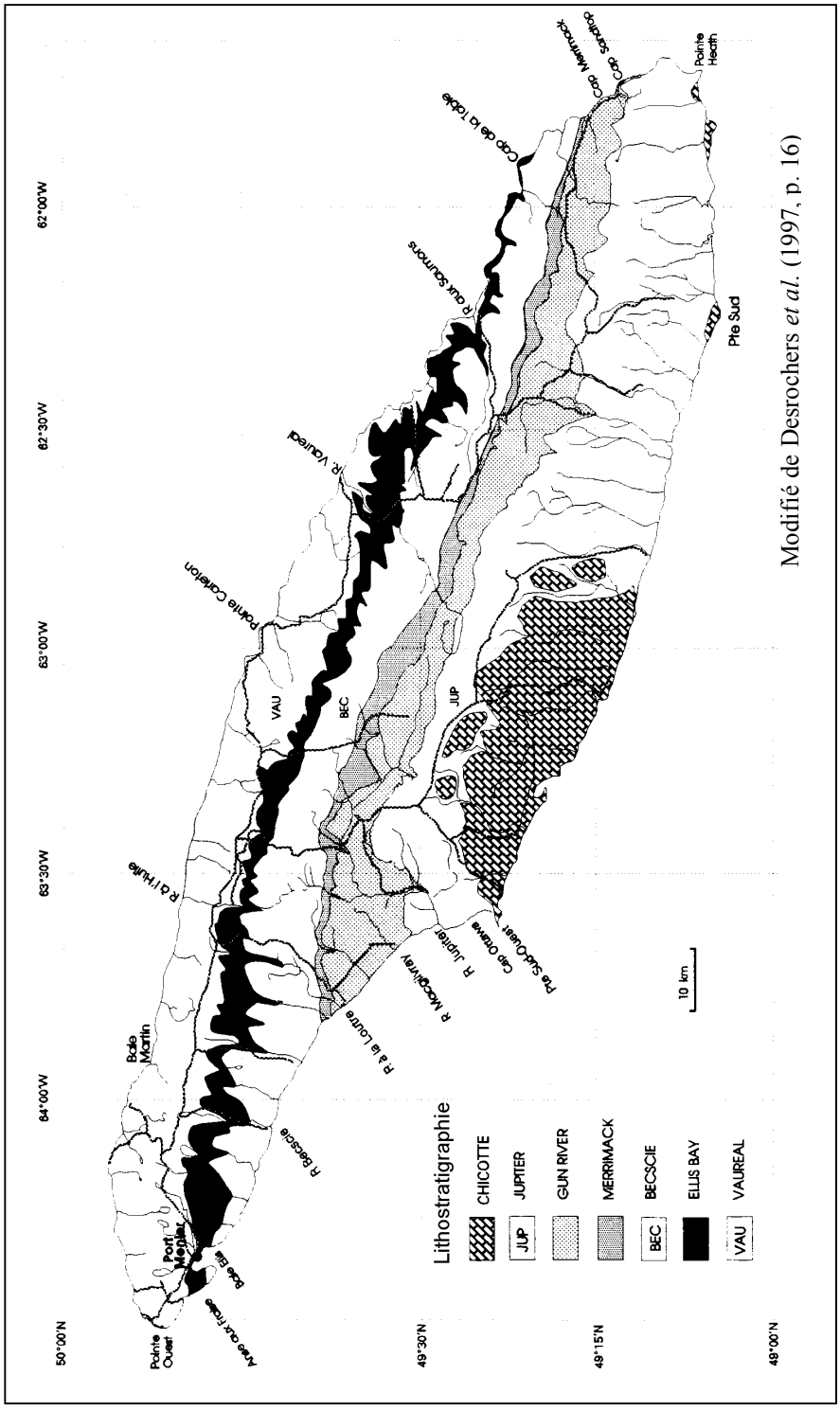


FIGURE 2 Géologie de l'île d'Anticosti et localisation de la zone d'étude. *Geology of Anticosti Island and location of study area.*

L'île est formée de roches paléozoïques. En surface, affleurent les formations ordoviciennes de Vauréal et de Ellis Bay ainsi que les formations siluriennes inférieures de Becscie, de Merrimack, de Gun River, de Jupiter et de Chicotte (Petryk, 1981; Long and Copper, 1994). Les formations présentes dans la zone d'étude sont celles de Vauréal, d'Ellis Bay et de Becscie, principalement constituées de calcaire mudstone. Les strates sont légèrement inclinées vers le sud-sud-ouest avec un pendage d'environ 2° et sont affectées par des diaclases subverticales d'orientations est-ouest et nord-sud.

La topographie du substratum rocheux est très peu influencée par les placages de formations meubles (Dubois *et al.*, 1984, 1990) : till, altérites, dépôts organiques, dépôts littoraux et alluvions.

La topographie ne dépasse pas 300 m d'altitude et le réseau hydrographique est surtout de type dérangé, c'est-à-dire un réseau avec des tronçons de diverses orientations et souvent discontinus. À part quelques rivières encaissées de type canyon, la plupart des cours d'eau sont intermittents et suivent un réseau de drainage dendritique; on y trouve aussi nombre de petits plans d'eau peu profonds et de tourbières.

De façon générale, les manifestations du karst sur l'île sont plutôt jeunes et témoignent d'une organisation primitive. Elles se retrouvent là où les gradients topographiques sont élevés (près des vallées, canyons) et elles se limitent aux membres carbonatés relativement purs (Roberge, 1979).

En surface, le karst de l'île se manifeste surtout par la présence de dolines et de diaclases élargies. Les dolines forment des dépressions ovales à circulaires dont le diamètre est généralement de l'ordre de plusieurs dizaines de mètres. Ces dolines sont souvent jointes l'une à l'autre, pour former une seule dépression plus large, aux formes arrondies, l'ouvala. Ces dernières ont un diamètre moyen qui varie entre quelques centaines de mètres et, parfois, quelques kilomètres. La plupart de ces ouvalas sont devenus des plans d'eau ou des tourbières. La majorité des dépressions sont visiblement influencés par l'orientation des réseaux de diaclases. La perméabilité des dépressions est parfois inégale car, en période d'étiage, certains plans d'eau se vident complètement (Côté *et al.*, 1990).

3. MÉTHODOLOGIE

La démarche suivie se divise en trois étapes : établissement de la réalité de terrain par photointerprétation, cartographie du karst à partir de l'image radar et comparaison de la réalité de terrain avec les résultats du traitement de l'image radar.

3.1. Données radar et de réalité de terrain

Pour être comparables avec la résolution de l'image radar, les données de la réalité de terrain proviennent principalement de l'interprétation des photographies aériennes noir et blanc de 1975 à l'échelle du 1 : 40 000. Quelques photographies au 1 : 15 000 de 1973 sont utilisées afin de confirmer l'interprétation de zones problématiques. Des cartes de formations meubles au 1 : 50 000, établies par deux des auteurs, aident aussi à parfaire l'interprétation (Dubois *et al.*, 1985).

L'image radar est de type aéroportée et a été acquise avec le SAR-580 du Centre canadien de télédétection le 29 novembre 1991 entre 19 h 00 et 20 h 00, heure locale. La longueur d'onde est de 5,6 cm (5,30 GHz), ce qui correspond à la bande C, en polarisation HH. La visée du capteur est N020°, les angles d'incidence sont compris entre 43° et 83° et la résolution mesurée est de 6,9 m (azimut) par 15,6 m (transversale).

3.2. Photointerprétation

L'identification des dépressions karstiques de surface a été faite par interprétation de la géomorphologie à partir des photographies aériennes. Parmi ces dépressions, plusieurs sont comblées, soit par de l'eau, soit par de la matière organique, notamment des tourbières. D'autres ne constituent que des accidents de terrain recouverts par la forêt boréale. On retient donc quatre classes : plans eau, tourbières, dépressions topographiques et cours d'eau.

3.3. Traitement de l'image radar

La première étape du traitement de l'image consiste à corriger le patron d'antenne de l'image radar. En regardant la moyenne des comptes numériques des lignes de l'image radar qui sont perpendiculaires à l'éclairement de l'antenne, on remarque une différence particulière de niveaux de gris entre le centre et les extrémités nord et sud. Pour corriger le patron d'antenne, un masque graphique est d'abord fait pour cacher les plans d'eau et les zones d'ombre de radar, pour éviter de biaiser les données par les faibles valeurs numériques de ces zones. Ensuite, la moyenne globale de l'image est calculée, puis une équation polynomiale qui épouse le mieux le profil radiométrique de la bande de terrain est appliquée. Pour chaque ligne, l'écart entre la moyenne globale et la valeur de l'algorithme pour la même ligne est soustrait ou ajouté, selon le cas, aux pixels de la ligne sur l'image.

Une fois la correction radiométrique terminée, une sous-image, couvrant la zone d'étude, soit de 1 024 pixels par 1 024 lignes, est découpée pour effectuer les classifications. Le chatoiement de l'image brute est alors filtrée au moyen d'un filtre médian 3 × 3, ce qui réduit les effets du chatoiement sans affecter spatialement les valeurs de l'image pour faire une classification spectrale basée sur la méthode de maximum de vraisemblance.

Afin de vérifier si elles peuvent améliorer la précision de la classification spectrale (Ulaby *et al.*, 1986), on ajoute des analyses de texture. D'après Marceau *et al.* (1989), la taille de la fenêtre joue un rôle prépondérant dans le niveau de précision de la classification. Pour déterminer cette dimension, un programme servant à calculer la variance des valeurs numériques à l'intérieur de fenêtres de dimensions variables est utilisé (Lanciault, 1997). On peut alors évaluer à partir de quelle dimension la variance ne change presque plus lorsqu'on augmente la taille de la fenêtre. Des fenêtres de 11 × 11 sont utilisées pour les analyses de texture, car c'est à partir de cette taille que la variance se stabilise avec cette image.

L'étape suivante consiste à connaître la corrélation entre les images résultantes des analyses de texture pour savoir lesquelles utiliser. Si l'information entre deux analyses de texture est semblable, la corrélation sera bonne et, par conséquent, elle ne peut être utilisée dans une classification. Ce sont donc les analyses de texture qui sont les moins bien corrélées entre elles qui sont utilisées. Ceci permet d'utiliser les images provenant des analyses de texture qui apportent le plus d'informations complémentaires.

Avec l'image filtrée médiane et celles provenant des analyses de texture, des classifications sont effectuées en prenant chaque bande individuellement et en combinant deux, puis trois bandes ensemble (tableau 1). Pour toutes les classifications, quatre classes de sites d'entraînement sont utilisées. Les trois premières classes font partie des structures propres au réseau karstique : lacs, tourbières et dépressions topographiques isolées. La quatrième classe constitue le terrain environnant, soit la zone non karstique, qui correspond principalement à la forêt d'épinettes noires. Une fois que les sites d'entraînement sont créés, avec un minimum de 100 pixels par classe, les signatures qui sont utilisées pour la classification sont produites. Puis, les signatures sont utilisées avec les bandes appropriées pour effectuer les classifications. Le résultat de cette classification est une image avec deux niveaux de gris. Le niveau de gris 1 correspond à la classe karstique, le niveau de gris 0 à celle du non karstique.

La dernière étape du traitement de l'image est d'effectuer une correction géométrique de l'image classée. Des points de contrôle provenant des cartes topographiques au 1 : 20 000 sont utilisés.

TABLEAU 1 Combinaisons de bandes utilisées pour la classification de l'image radar. *Combinations of the channels used to classify the radar image.*

	Combinaisons utilisées
1 bande	Filtrée médian
	Corrélation
	Second moment angulaire
	Contraste de la différence du niveau de gris des vecteurs (DNGV)
2 bandes	Filtrée médian + corrélation
	Filtrée médian + second moment angulaire
	Filtrée médian + contraste de la DNGV
	Corrélation + second moment angulaire
	Corrélation + contraste de la DNGV
	Second moment angulaire + contraste de la DNGV
3 bandes	Filtrée médian + corrélation + second moment angulaire
	Filtrée médian + corrélation + contraste de la DNGV
	Filtrée médian + second moment angulaire + contraste de la DNGV
	Corrélation + second moment angulaire + contraste de la DNGV

3.4. Extraction des données sur le karst

La méthode de la grille d'échantillonnage apparaît comme la meilleure façon de comparer la carte provenant de la photointerprétation avec celle provenant du traitement de l'image radar. En effet, le but est de classer chacune des cellules de la grille en fonction d'un niveau d'intensité karstique. Cette comparaison permet de constater les différences possibles entre les résultats de la réalité de terrain et ceux provenant du traitement de l'image radar.

La première étape consiste à trouver une méthode pour déterminer la dimension des cellules de la grille afin que l'échantillonnage à l'intérieur des cellules soit statistiquement valable. Il existe une équation, utilisée par les biologistes, qui se base sur l'échantillonnage de points sur une zone d'étude à l'aide d'une grille d'échantillonnage (Miller and Kahn, 1962). Dans le cas des structures karstiques, la dimension des surfaces varie considérablement (400 à 5 000 m²) et il faut donc adapter la formule pour cette situation particulière :

$$m = \frac{2A}{n\left(\frac{1-s}{A}\right)} \quad (1)$$

où m est la dimension optimale des cellules, A est l'aire totale du terrain, n est le nombre total de dépressions et s est la superficie totale des dépressions.

L'élément ajouté, $1 - s / A$ au dénominateur, représente le rapport qui détermine la fraction de superficie inoccupée par les dépressions. Il a pour conséquence d'augmenter la taille des cellules en fonction de la superficie occupée par les dépressions. Il est intéressant de noter que, dans la situation actuelle, la superficie totale des dépressions est trop faible pour avoir une influence sur le résultat. En se basant sur la photo-interprétation, on a évalué que la zone d'étude occupe 340,4 km² (A), que le nombre de dépressions (n) est de 1 492 et que ces dépressions couvrent 27,3 km² (s). La taille optimale des cellules (m) est donc de 0,45 km², ce qui donne 0,7 km d'arête aux mailles de la grille. Pour des raisons pratiques, on a décidé d'arrondir cette valeur à 1 km, de sorte que la grille coïncide ainsi avec des coordonnées UTM. Mais, on se retrouve donc avec un léger sous-échantillonnage.

La dimension des cellules de la grille étant connue, il est possible d'extraire les données. Les étapes qui seront maintenant décrites sont faites sur la carte des dépressions topographiques repérées par photointerprétation puis sur l'image radar. Une grille matricielle ayant les caractéristiques suivantes est réalisée : chaque cellule a 50 pixels de côté avec un accroissement numérique d'une cellule à l'autre (Chassé, 1999). La dimension totale de cette grille est de 1 000 pixels par 900 lignes, ce qui correspond aux dimensions du terrain.

L'extraction des données se fait en deux étapes. D'abord, une superposition de deux couches est effectuée : la grille d'échantillonnage est multipliée avec la carte des dépressions en format binarisé, soit 1 (karstique) et 0 (non karstique). Puisque les cellules de la grille d'échantillonnage subissent un accroissement numérique, on obtient alors une carte où, à l'intérieur d'une cellule, on accorde aux dépressions la même valeur que le numéro de la cellule dans laquelle ils se trouvent, et les zones non karstiques gardent la valeur 0. La deuxième étape consiste à calculer le nombre de groupes (dépressions) ayant la même valeur. Ce nombre de groupes correspond au nombre de dépressions à l'intérieur d'une cellule. En calculant le nombre de pixels qui ont la même valeur et en multipliant ce nombre par la résolution (20 m), on obtient la superficie occupée par les dépressions dans chaque cellule.

Habituellement, les cartes de géorisques karstiques sont basées uniquement sur la densité des dolines. Les résultats montrent une certaine variation dans la superficie des dépressions. Ceci occasionne des situations où l'intérieur de certaines cellules peut contenir plusieurs dépressions de petite taille alors que d'autres ont seulement une ou deux dépressions qui occupent une superficie importante. Dans le premier cas, la densité est élevée, mais la superficie est faible alors que, dans le deuxième cas, la densité est faible, mais la superficie est importante. Puisque les grandes dépressions représentent souvent un regroupement de petites dépressions (ouvalas), du point de vue de l'aménagement, la densité seule ne suffit pas à représenter le niveau de développement karstique, dans la mesure où le karst continue d'évoluer. Pour cette raison, on inclut également la superficie comme donnée d'entrée. Cette information est facile à extraire à partir des cartes de dépressions combinées à la grille et elle contribue à la caractérisation de l'intensité karstique dans chaque cellule de cette grille.

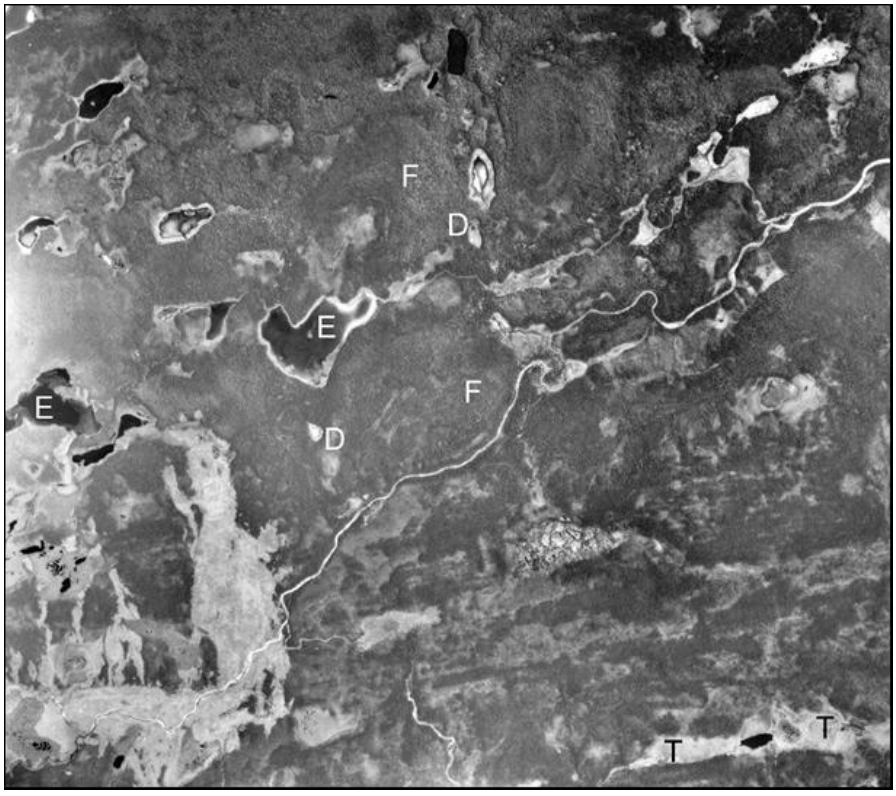
Pour les cellules qui ne sont pas toujours complètes, notamment celles qui suivent la côte, la densité et la superficie doivent être modifiées pour qu'elles aient toutes un poids égal. Il faut alors multiplier la densité et la superficie par le rapport entre la taille normale et la taille réelle de la cellule.

Pour produire les cartes de géorisques, il est proposé d'utiliser quatre niveaux de karstification soit : non karstique (k_0), faiblement karstique (k_1), moyennement karstique (k_2) et fortement karstique (k_3). L'utilisateur pourra ainsi éviter les zones à risque élevé et faire des études plus approfondies sur les zones moyennement karstiques pour préciser sa classification.

La classe k_0 est celle où les cellules ne contiennent aucune dépression. Les valeurs de superficie et de densité étant exponentielles, la démarche à suivre afin de répartir un nombre égal de cellules dans chaque classe est la suivante. D'abord, il faut classer les données de densité et de superficie par ordre croissant. Ensuite, le nombre de cellules qui ne contiennent pas de valeurs nulles est compté.

Puisqu'il y a trois classes karstiques (k_1, k_2 et k_3), il faut diviser le nombre de cellules non nulles par ce nombre de classes (3). Le résultat constitue le nombre de cellules devant se trouver dans chaque classe karstique. En additionnant ce dernier résultat avec celui du nombre de cellules non karstiques, la limite supérieure de densité et de superficie de la première classe (k_1) peut être connue (figure 3). Il suffit d'ajouter une autre fois le nombre de cellules d'une classe karstique afin de connaître la densité et la superficie correspondant à la limite supérieure de la classe moyennement karstique.

Pour attribuer une valeur de 0 à 3, décrivant le niveau d'intensité karstique (k_0 à k_3), il faut utiliser un opérateur logique. Avec la densité, si la valeur est plus grande que le maximum de la deuxième classe, le résultat est 3 ; si la valeur est plus grande que le maximum de la première classe, le résultat est 2 ; si la valeur est plus grande que 0, le résultat est 1 ; et si la valeur est 0, la classe est 0. La même opération est répétée pour la superficie des dépressions dans chaque cellule. L'addition des valeurs des classes de densité et de superficie constitue le résultat final, c'est-à-dire l'intensité karstique. Ce résultat peut être 0, 2 à 6 (0, 1, 2 et 3 de niveau de densité additionné à 0, 1, 2, 3 de niveau de superficie). Le résultat final de 1 est impossible. Les valeurs combinées 2 et 3 vont dans la classe k_1, la valeur 4 dans la classe k_2 et les valeurs 5 et 6 dans la classe k_3 (tableau 2). Une fois ces valeurs attribuées, elles seront utilisées pour remplacer les valeurs numériques des cellules de la grille. Une couleur peut être attribuée à ces quatre valeurs. La classe k_0 sera blanche, la k_1 sera jaune, la k_2 orange et la k_3 rouge, rendant les cartes de géorisques visuellement interprétables.



Q75835-173

Légende : D = dépression
E = eau
F = forêt boréale
T = tourbière

FIGURE 3 Exemple de photographie aérienne utilisée pour la photo-interprétation. *Example of an airphotograph used for photointerpretation.*

TABLEAU 2 Attribution des classes d'intensités en fonction des niveaux de densité et de superficie des cellules. *Intensity class designation as a function of the density and area of the depressions.*

	Densité	Superficie	Intensité
Classes	0	0	0
	1	1	1
		2	1
		3	2
	2	1	1
		2	2
		3	3
	3	1	2
		2	3
		3	3

4. ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

4.1. Photointerprétation

Dans l'exemple de photointerprétation présenté aux figures 4 et 5, on remarque la différence entre les dépressions qui sont comblées (plans d'eau et tourbières) et celles qui ne le sont pas, telles les dépressions isolées (tableau 3).

Le résultat de la numérisation de la mosaïque des photographies aériennes interprétées est présenté à la figure 6. Les dépressions ont un diamètre de 20 m à 1,5 km. La répartition des dépressions pour chaque catégorie de dimension est répartie spatialement de façon égale. Seules certaines bandes sur la carte ne présentent aucune dépression car elles correspondent aux canyons situés dans la partie nord de la zone d'étude.

La superposition avec la grille d'échantillonnage des résultats de la photointerprétation a permis d'extraire le nombre de dépressions et la superficie occupée par ces dépressions à l'intérieur de chaque cellule.

Dans l'histogramme de la densité des dépressions, 17 % des cellules ne contiennent pas de dépressions (figure 7). L'augmentation de la densité des dépressions se fait de façon linéaire jusqu'à une densité de 9 dépressions par cellule. Au delà, l'augmentation se fait de façon exponentielle jusqu'à une densité maximale de 21 dépressions par cellule. Au plan de la superficie des dépressions (figure 8), on obtient une croissance exponentielle plus prononcée que sur celui de la densité des dépressions. L'augmentation de la superficie des dépressions par cellule est faible jusqu'à 240 000 m^2, mais elle est plus prononcée pour les cellules qui ont une plus grande superficie de dépressions. La superficie maximale des dépressions à l'intérieur d'une cellule est de 530 000 m^2.

Le coefficient de corrélation est moyen (0,42) entre le nombre de dépressions et la superficie de ces dernières (figure 9). Le niveau de corrélation entre le nombre de dépressions et leur superficie est complémentaire puisqu'il y a environ 60 % plus d'information en utilisant les deux paramètres conjointement que si un seul paramètre est utilisé.

Les limites des classes, basées sur la densité et la superficie, peuvent impliquer une légère inégalité dans le nombre de cellules réparties dans chaque classe karstique (faible, moyen et fort). En effet, il arrive que l'augmentation de la densité et de la superficie se fasse par paliers si plusieurs cellules ont les mêmes valeurs (figure 7). Les limites des classes, à partir du nombre de cellules (figure 4), peuvent se situer au milieu d'un de ces paliers. Puisque ce sont les valeurs de densité et de superficie qui servent de limites aux classes, il y a alors une différence entre le nombre de cellules, calculé a partir des histogrammes et du nombre effectif de cellules (tableau 4).

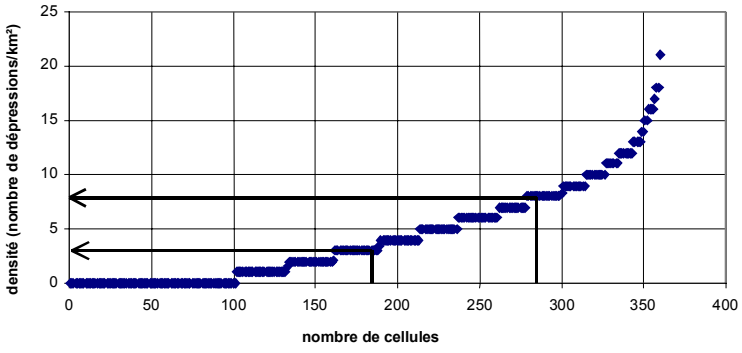
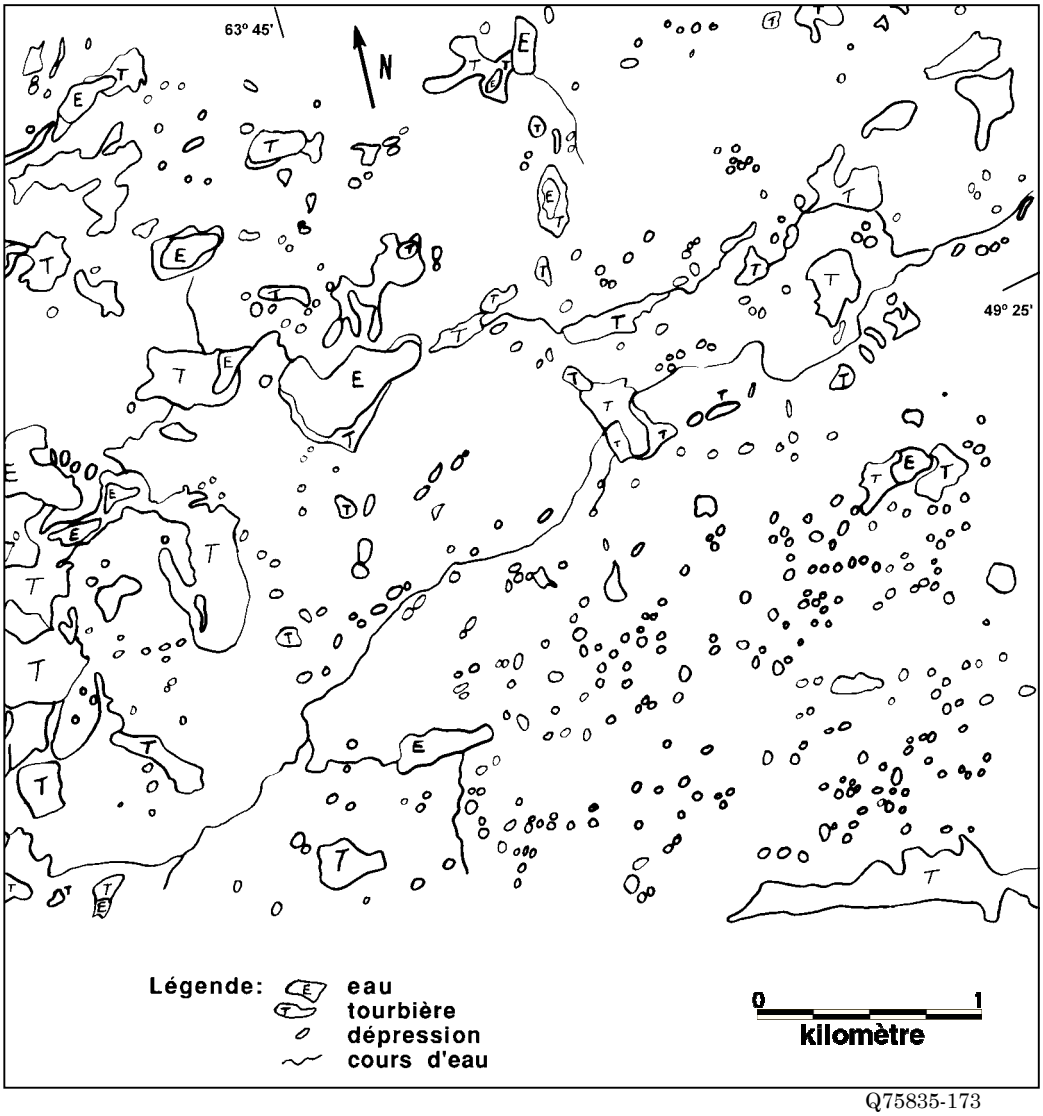


FIGURE 4 Exemple illustrant la correspondance des classes de densités à partir du nombre de cellules avec des valeurs fictives. *Example illustrating the relation between the density classes based on the number of cells using hypothetical values.*



Q75835-173

FIGURE 5 Interprétation de la photographie aérienne présentée sur la figure 3. *Interpretation of the airphotograph presented in figure 3.*

TABLEAU 3 Caractéristiques des différents types de formes karstiques. *Characteristics of different karst forms.*

Classes		Caractéristiques	
		Photointerprétation	Traitement d'image
Karstiques	Plans d'eau (E)	- Dimensions et formes variables - Tonalité foncée à moyenne et blanche (reflets) - Texture lisse - En dépressions planes	- Dimensions et formes variables - Valeurs numériques très faibles - Texture lisse
	Tourbières (T)	- Dimensions et formes variables - Tonalité pâle à moyenne et très foncée - Texture plutôt lisse (organique) à tachetée grossière (organique + eau) à moyenne (avec végétation) - En dépressions planes	- Dimensions et formes variables - Valeurs numériques faibles à moyennes - Texture prononcée
	Dépressions isolées (D)	- Faibles dimensions, formes circulaires à ovales - Tonalité pâle - Texture variable (généralement lisse) - En faibles dépressions	- Faibles dimensions - Valeurs numériques variables - Texture plutôt lisse
Non karstique (F)		- Arrière-plan - Tonalité moyenne - Texture prononcée - Topographie variable	- Arrière-plan - Valeurs numériques faibles à très fortes - Texture prononcée

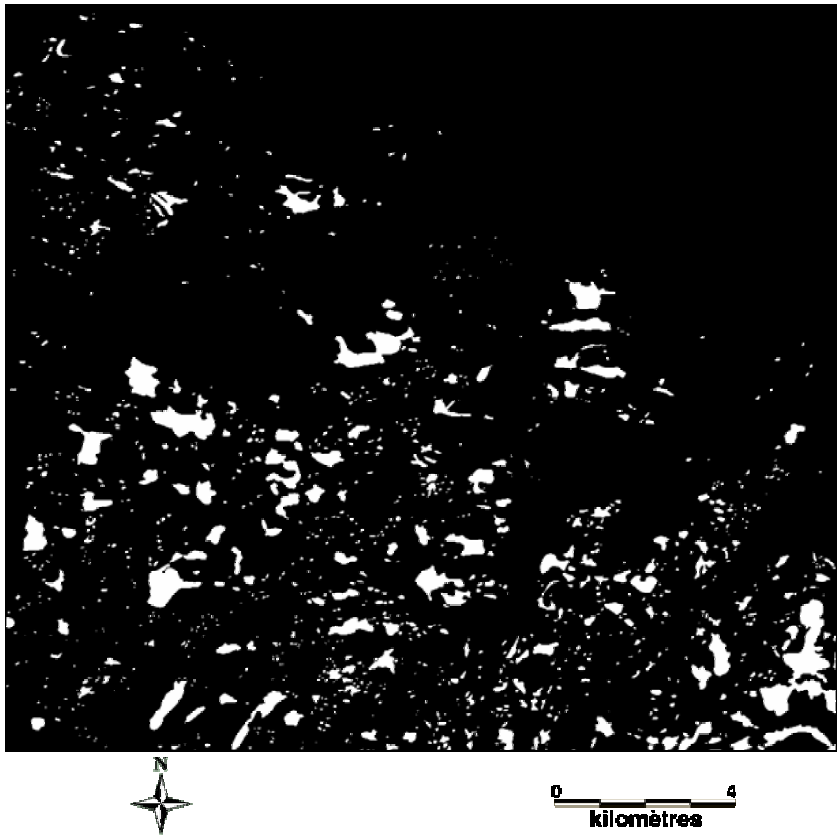


FIGURE 6 Carte des dépressions (en blanc) repérées par photointerprétation. *Map of the depressions (white) based on photointerpretation.*

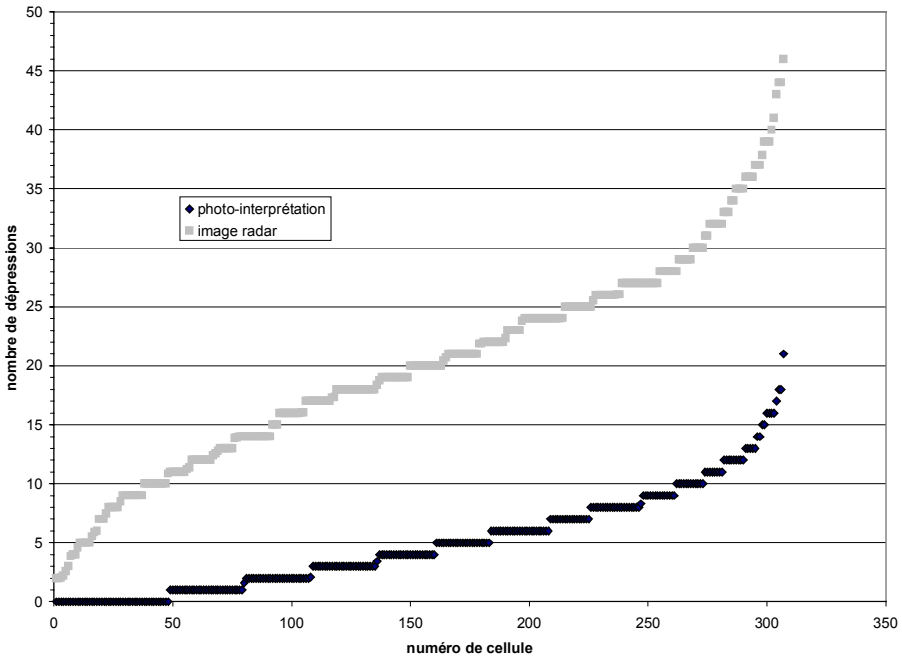


FIGURE 7 Histogramme du nombre de dépressions par cellule de la grille d'échantillonnage. *Histogram of the number of depressions per cell in the sampling grid.*

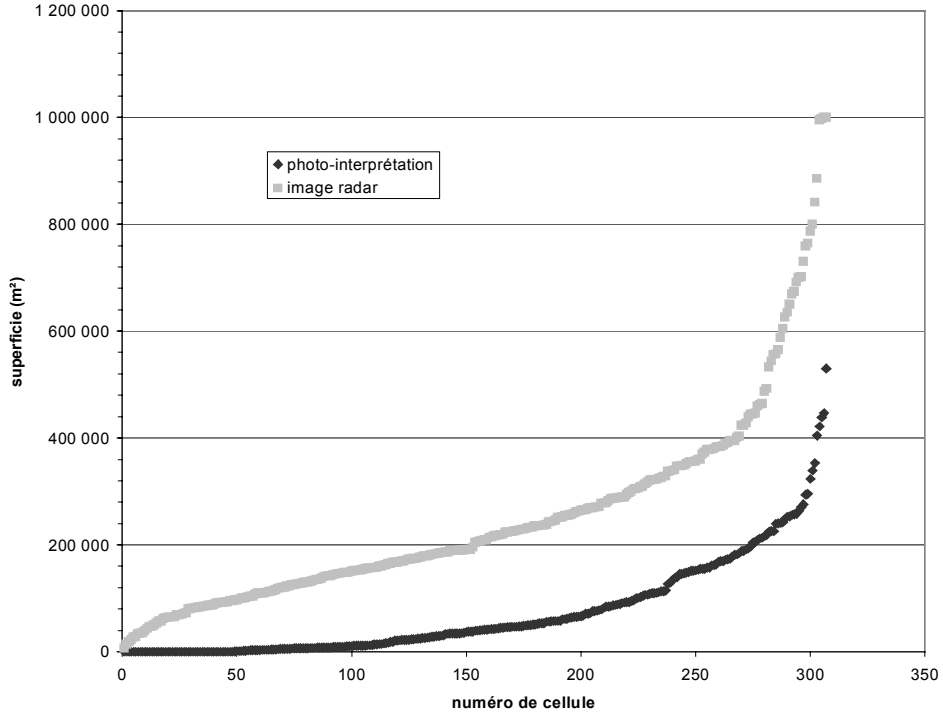


FIGURE 8 Histogramme de la superficie des dépressions par cellule de la grille d'échantillonnage. *Histogram of the area of the depressions per cell in the sampling grid.*

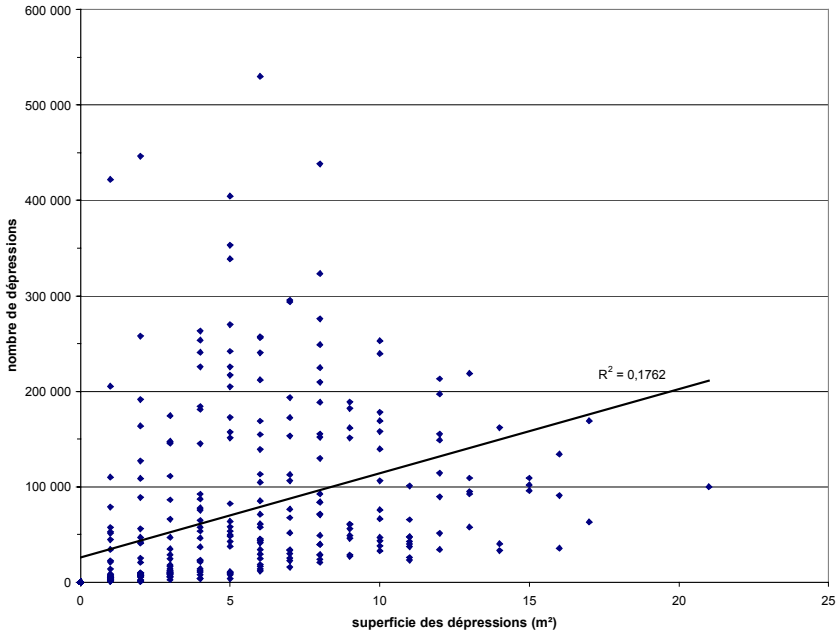


FIGURE 9 Corrélation entre la superficie et le nombre des dépressions par cellule repérées par photointerprétation. *Correlation between the area and number of depressions mapped by photointerpretation.*

TABLEAU 4 Nombre de cellules calculé et effectif entre les classes de densité et de superficie pour la photo-interprétation et le traitement de l'image radar. *Calculated and actual number of cells between the density and area classes based on photo-interpretation and radar image analysis.*

		Numéros de cellules calculés	Limites de densité (nbr./cell.)	Numéros de cellules effectifs densité)	Limites de superficie (m^2/cell.)	Numéros de cellules effectifs superficie)
Photo-interprétation	Non karstique	1-49	0	1-49	0	52-101
	Faible	50-135	1-3	50-137	400-27 200	102-187
	Moyen	136-223	4-7	138-229	27 600-92 800	188-274
	Fort	224-307	8-21	230-307	93 200-530 000	275-360
Image radar	Non karstique	0	0	0	0	0
	Faible	1-102	1-16	1-104	400-151 200	62-162
	Moyen	103-205	17-24	105-210	151 600-268 800	163-261
	Fort	206-307	25-46	211-307	269 200-1 000 000	262-360

4.2. Traitement de l'image radar

Les résultats du traitement de l'image radar portent sur le choix des analyses de texture utilisées dans les classifications, la distinction des signatures et les résultats des différentes classifications effectuées.

Le choix des types d'analyse de texture a été fait à l'aide de la corrélation entre les images résultant des analyses de texture. Cette méthode de sélection assure que les bandes employées sont indépendantes. Les trois mesures de texture les moins corrélées sont celles de la corrélation, du second moment angulaire et du contraste de la différence du niveau de gris des vecteurs (tableau 5).

La classification basée sur le maximum de vraisemblance se fait avec des signatures possédant une bonne distinction pour éviter la confusion entre les classes. Sur le tableau 6, on remarque que la distinction entre les plans d'eau, les tourbières et les dolines est excellente (2 sur un maximum de 2). La distinction entre les signatures des tourbières et celles des dolines isolées est de 1,86. Cette valeur est acceptable pour effectuer la classification car ces deux classes font partie des formes karstiques. En effet, les classes de plans d'eau, de tourbières et de dépressions isolées font partie de la classe karstique et c'est la distinction entre le non karstique et les autres classes qui importe le plus.

Les résultats des classifications sont présentés sur le tableau 7. La confusion entre les classes 1 (plans d'eau), 2 (tourbières) et 3 (dolines isolées), qui constituent le domaine karstique, et la classe 4 (non karstique) doit être minimale. Ceci veut dire que le pourcentage de pixels des classes 1, 2 et 3 classés dans la classe 4 doit être minimal et que le pourcentage de pixels de la classe 4 classés correctement doit être maximal.

Pour les classifications avec une seule bande, les meilleurs résultats sont obtenus avec l'image filtrée médian, où 97,6 % des pixels non karstiques sont classés correctement et seulement 1,5 % des pixels des classes karstiques sont classés dans le non karstique. La meilleure classification basée sur une seule bande de texture est obtenue avec le second moment angulaire, alors que 56,1 % des pixels non kartstiques sont classés correctement, mais 19,2 % des classes karstiques sont classés non karstiques

En utilisant deux bandes, il y une nette amélioration. Un combiné de l'image filtrée médian et de l'image de texture du second moment angulaire donne 97 % de pixels classés correctement et seulement 0,3 % de pixels des classes karstiques classés dans le non karstique (tableau 7). La combinaison de l'image filtrée médian et de l'image de texture du contraste donne presque les même résultats.

En se servant de trois bandes, les meilleurs résultats sont obtenus avec la combinaison de l'image filtrée médian et de l'image de texture du second moment angulaire ainsi que de celle du contraste de la différence de niveaux de gris des vecteurs (tableau 7). Il y a alors 96 % des pixels des classes karstiques qui sont classés correctement et 0,2 % des pixels de la classe non karstique qui sont classés dans les classes karstiques.

À la suite de ces résultats, la classification avec l'image radar filtrée médian et l'image de texture du second moment angulaire a été effectuée (figure 10). On remarque de grandes dépressions au nord de la zone d'étude (figure 11). Ces dernières correspondent aux zones d'ombre de radar dans les canyons, causé par la confusion entre les plans d'eau et l'ombre de radar. Ailleurs sur l'île, les dépressions de tailles moyennes correspondent à des plans d'eau ou à des tourbières. Les plus petites dépressions constituent les dolines isolées. Les linéaments classés comme des dépressions sont les cours d'eau majeurs.

TABLEAU 5 Corrélation entre les analyses de texture. *Correlation between the different texture analyses results.*

	Homogénéité	Contraste	Dissimilarité	Moyenne	Écart type	Entropie	SMA	Corrélation
Homogénéité	1							
Contraste	-0,63	1						
Dissimilarité	-0,82	0,95	1					
Moyenne	-0,77	0,68	0,80	1				
Écart type	-0,77	0,68	0,80	0,98	1			
Entropie	-0,88	0,55	0,72	0,71	0,71	1		
SMA	0,77	-0,46	-0,53	-0,55	-0,55	-0,91	1	
Corrélation	-0,56	0,81	0,80	0,78	0,78	0,50	**-0,30**	1
DNGV SMA	0,88	-0,66	-0,81	-0,77	-0,77	-0,93	0,84	-0,54
DNGV entropie	-0,85	0,83	0,93	0,81	0,81	0,86	-0,71	0,68
DNGV moyenne	-0,82	0,95	0,98	0,80	0,80	0,72	-0,53	0,80
DNGV contraste	-0,63	0,98	0,95	0,68	0,68	0,55	**-0,36**	0,81
	DNGV SMA	DNGV entropie	DNGV moyenne	DNGV contraste	SMA = second moment angulaire DNGV = différence du niveau de gris des vecteurs			

TABLEAU 6 Rapport de distinction des classes de signatures du traitement de l'image radar. *Separability ratios of the class signatures used in the radar image analysis.*

Mesure de distinction : divergence transformée

Segments de signature : 6, 7, 8, 9

Bandes de signature : 6, 7

Distinction moyenne : 1,97649
Distinction minimale : 1,85892
Distinction maximale : 2,0

Signature de paires avec le minimum de distinction : (7, 8)

Matrice de distinction :

```
    6    7    8
 +---------------------------
 7|  2,0
 8|  2,0 1,85892
 9|  2,0 2,0 2,0
```

Correspondance des segments : 6 = plans d'eau, 7 = tourbières, 8 = dolines isolées, 9 = zone non karstique (forêt). Les valeurs de distinction peuvent varier de 0 à 2.

TABLEAU 7 Meilleurs résultats des classifications pour chaque taille de fenêtre, en fonction de 1, 2 et 3 bandes. *Best results of the classification for window size, as a function of using 1, 2 and 3 channels.*

1 bande	Filtrée	SMA	Cor.	DNGV		
Karstiques (1, 2, 3) dans non karstique (4)	1,5	19,2	70,6	49,6		
Karstique (4)	97,6	56,1	83,7	67,7		
Précision globale	94,7	66,6	78,3	72,2		
Non classés	0,8	0	1,5	2,0		
2 bandes	Filtrée + SMA	Filtrée + Cor.	Filtrée + DNGV	SMA + Cor.	SMA. + DNGV	Cor. + DNGV
Karstiques (1, 2, 3) dans non karstique (4)	0,3	1,3	0,4	26,7	21,9	38,7
Karstique (4)	97,0	96,7	96,9	72,4	61,4	76,9
Précision globale	96,6	96,5	97,3	77,9	70,0	78,6
Non classés	1,7	22,2	5,4	4,1	4,2	3,4
3 bandes	Filtrée + SMA + Cor.	Filtrée + SMA + DNGV	Filtrée + Cor. + DNGV	SMA + Cor. + DNGV		
Karstiques (1, 2, 3) dans non karstique (4)	0	0,2	0	0		
Karstique (4)	95,7	96,0	94,9	96,1		
Précision globale	95,1	95,8	95,3	95,5		
Non classés	24,5	10,0	30,5	3,7		

Note : SMA = second moment angulaire ; Cor. = corrélation ; DNGV = contraste de la différence du niveau de gris des vecteurs

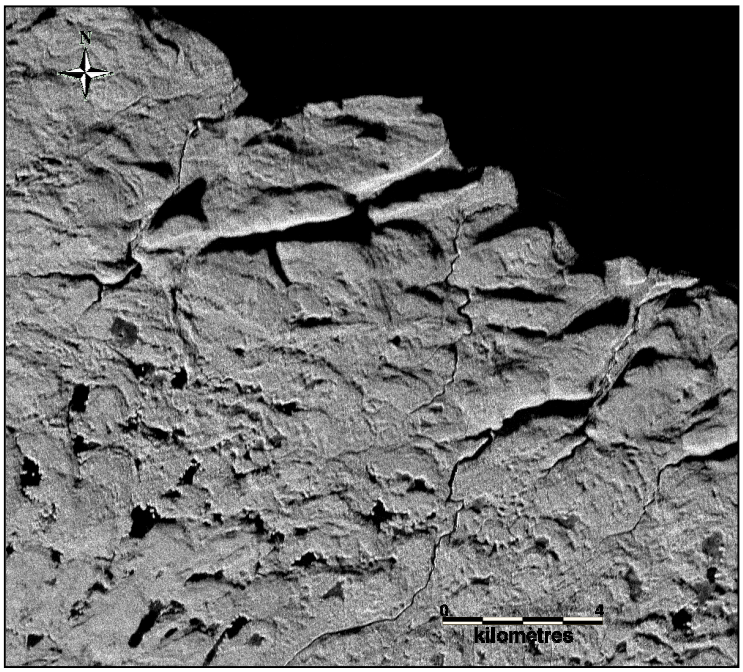


FIGURE 10 Image radar du terrain après la correction géométrique. *Geometrically corrected radar image of the study area.*

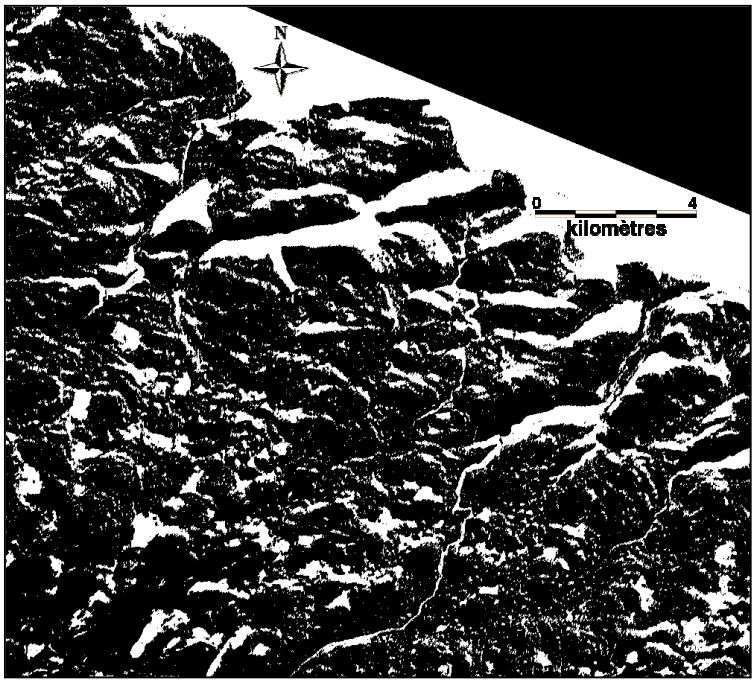


FIGURE 11 Carte des dépressions (en blanc) basée sur le traitement de l'image radar. *Map of the depressions (white) based on radar image analysis.*

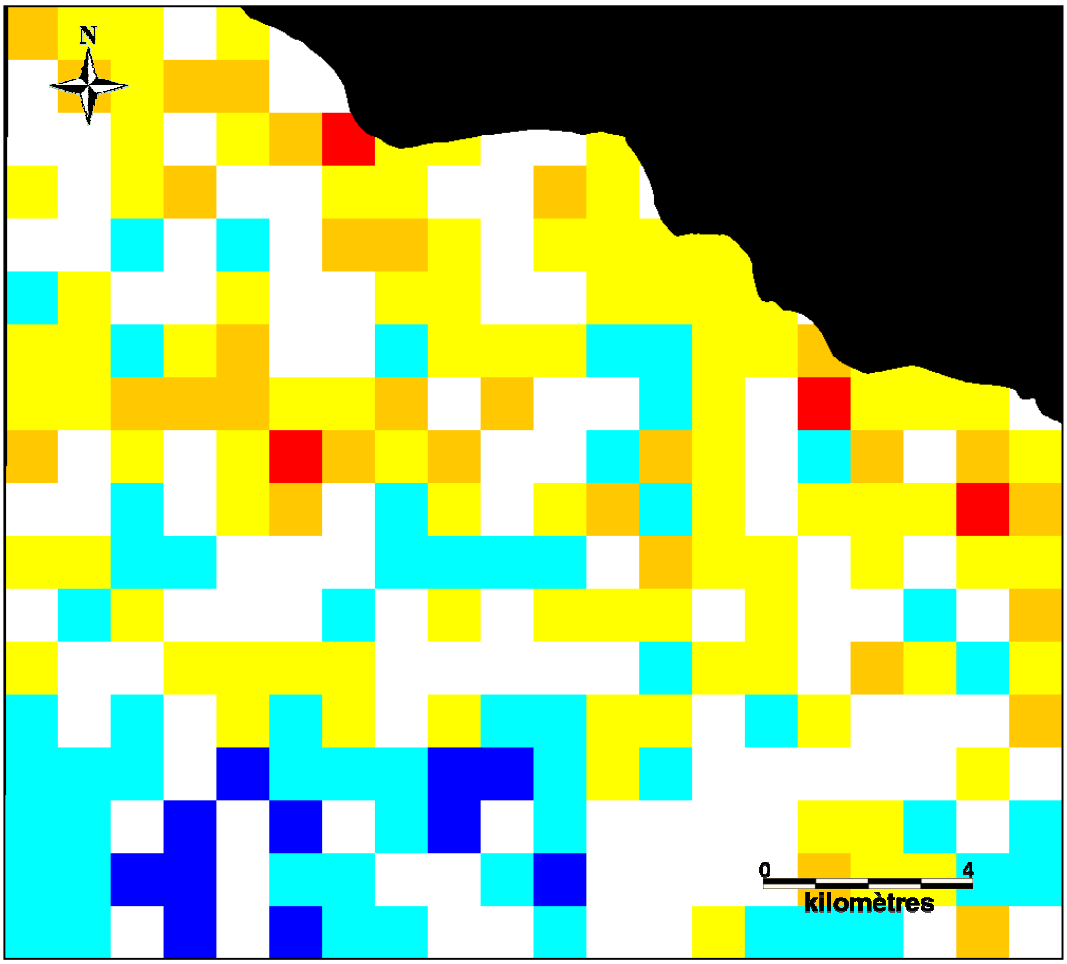


FIGURE 12 Différence des niveaux de densité : image radar moins photointerprétation. *Difference in densities: radar image minus the photointerpretation results.*

Rouge = +3 ; orange = +2 ; jaune = +1 ; blanc = 0 ; bleu = –1 ; bleu foncé = –2

4.3. Comparaison entre la photointerprétation et la classification de l'image radar

Les différences de classement ont été effectuées en comparant les résultats des cartes des niveaux de densité, de superficie et des classes d'intensité karstique, obtenues à partir de la photo-interprétation, avec les résultats provenant du traitement numérique d'image

4.3.1. Densité

Sur la figure 12, on montre la différence entre les niveaux de densité issus du traitement de l'image radar et de la photointerprétation. Les cellules avec une différence de -2 se trouvent exclusivement au sud de la zone d'étude. Les cellules avec une différence de -1 sont dispersées mais avec une légère concentration au sud-est de la zone d'étude. On retrouve des cellules avec un niveau de différence nul partout. Les cellules qui ont un niveau de différence de +1 sont aussi dispersées à l'exception du secteur sud-est. Les cellules avec une différence de +2 sont réparties surtout au nord de la zone d'étude. Les cellules avec un niveau de différence de +3 se trouvent exclusivement dans la moitié nord de cette zone. La grande majorité (86,4 %) des cellules ne présente qu'une faible différence de densité (-1 à +1) entre les résultat de la photo-interprétation et celle de l'analyse de l'image radar (figure 13). Également, il n'y a qu'un faible pourcentage (1,4 %) des cellules qui ont un niveau de différence de densité de +3.

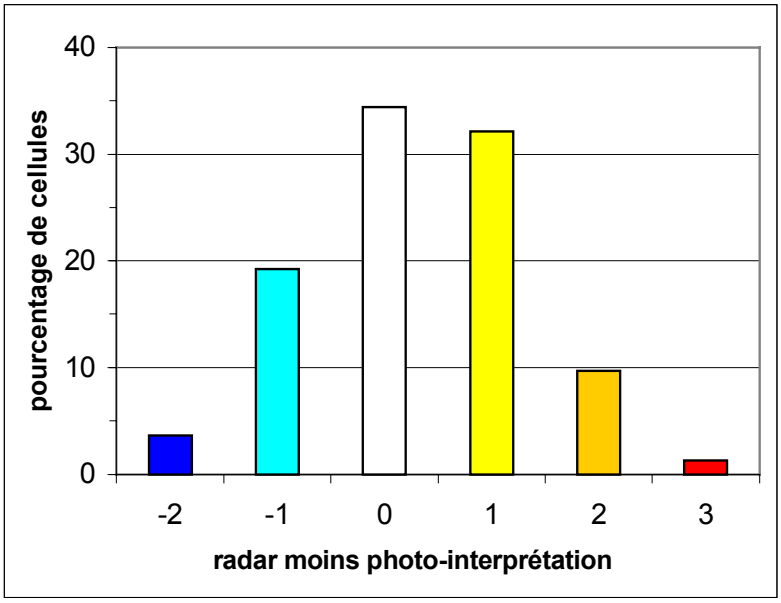


FIGURE 13 Pourcentage de cellules pour chaque niveau de différence de densité entre le traitement de l'image radar et le résultat de la photointerprétation. *Percentage of the cells for each level of difference in density between the radar image and the photointerpretation.*
Bleu foncé = –2 ; bleu = –1 ; blanc = 0 ; jaune = +1 ; orange = +2 ; rouge = +3.

4.3.2. Superficie

La variation de la répartition entre les niveaux de superficie provenant de la photointerprétation et du traitement de l'image radar est présentée sur la carte de la différence des niveaux de superficie (figure 14). Les cellules qui ont une différence de superficie de -2 se trouvent surtout au sud de la zone d'étude. La même situation prévaut avec les cellules qui ont un niveau de différence de -1. Les cellules dont le niveau de différence est nul sont dispersées. Les cellules dont le niveau de différence est de +1 sont surtout concentrées au nord de la zone d'étude. Les cellules avec les niveaux de différences de +2 et +3 se trouvent uniquement au nord de la zone d'étude. Ici encore, la majorité des cellules (72,6 %) ont un niveau de différence faible (-1 à +1). Cependant, 8,5 % ont un niveau de différence de superficie de +3, soit le double de cellules par rapport à la densité (figure 15).

4.3.3. Intensité

Sur la figure 16, on montre la répartition des différences de classes d'intensité karstique entre les résultats provenant de la photointerprétation et ceux provenant du traitement de l'image radar. Les différences vont de -2 à +3 (classe radar moins classe par photointerprétation). Généralement, les cellules n'ont subi aucun ou qu'un faible changement (72 %). Les différences négatives, c'est-à-dire les endroits où il y a une moins grande représentation sur l'image radar, se trouvent surtout au sud. Les cellules qui ne montrent aucune différence d'intensité sont dispersées mais plus particulièrement au centre de la zone d'étude. Les différences positives, c'est-à-dire les cellules où il y a une plus grande représentation de l'intensité karstique sur l'image radar, sont concentrées au nord.

Il y a 25,1 % des cellules qui n'ont aucune différence d'intensité à la suite de la comparaison entre les résultats provenant de la photo-interprétation et ceux provenant de l'analyse de l'image radar, 47,4 % ont un niveau de différence d'intensité karstique de ± 1 et 72,5 % ne montrent aucune ou seulement une faible différence (figure 17). Il y a 26,1 % des cellules qui ont un niveau de différence de ±2 et 2,4 % qui ont un niveau de différence d'intensité de +3.

4.4. Interprétation des résultats

En fonction de l'intensité karstique, on remarque la disparité dans la répartition des cellules où la différence est négative et positive (figure 16). Les différences négatives sont concentrées au sud de la zone d'étude et les différences positives au nord.

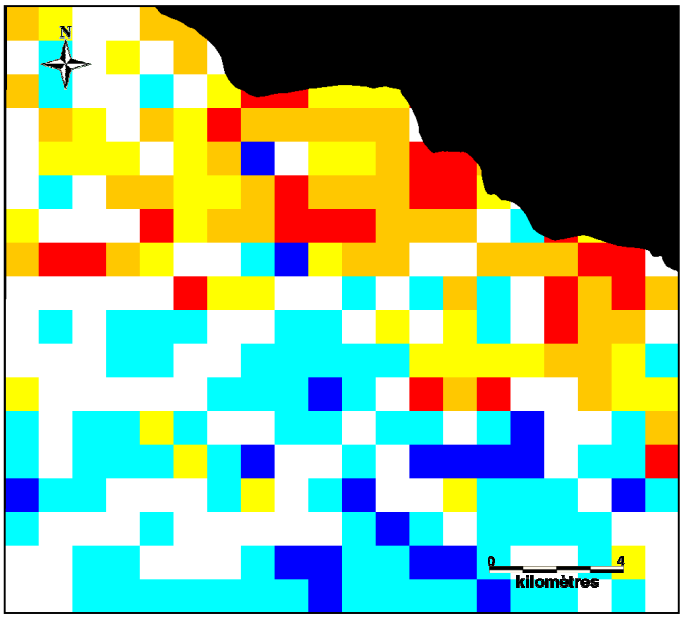


FIGURE 14 Différence des niveaux de superficie : image radar moins photointerprétation. *Difference in the areas: radar image minus the photo-interpretation results.*
Rouge = +3 ; orange = +2 ; jaune = +1 ; blanc = 0 ; bleu = -1 ; bleu foncé = -2

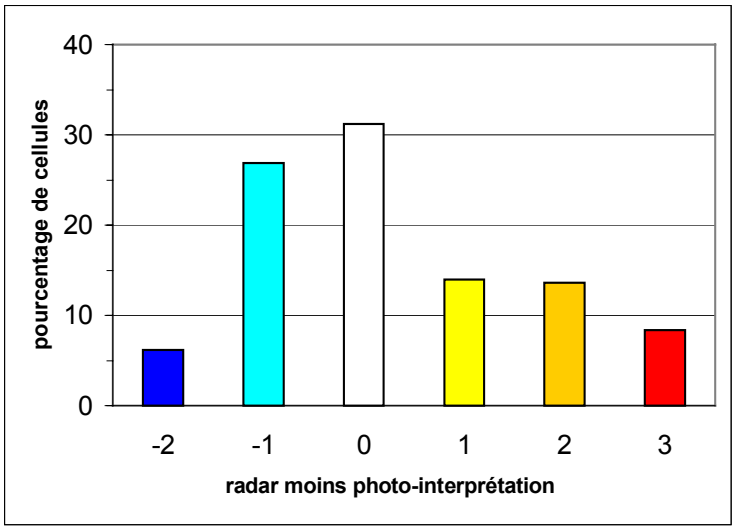


FIGURE 15 Pourcentage de cellules pour chaque différence de niveau de superficie entre le traitement de l'image radar et le résultat de la photointerprétation. *Percentage of the cells for each level of difference in area between the radar image and the photointerpretation results.*
Bleu foncé = –2 ; bleu = –1; blanc = 0 ; jaune = +1 ; orange = +2 ; rouge = +3.

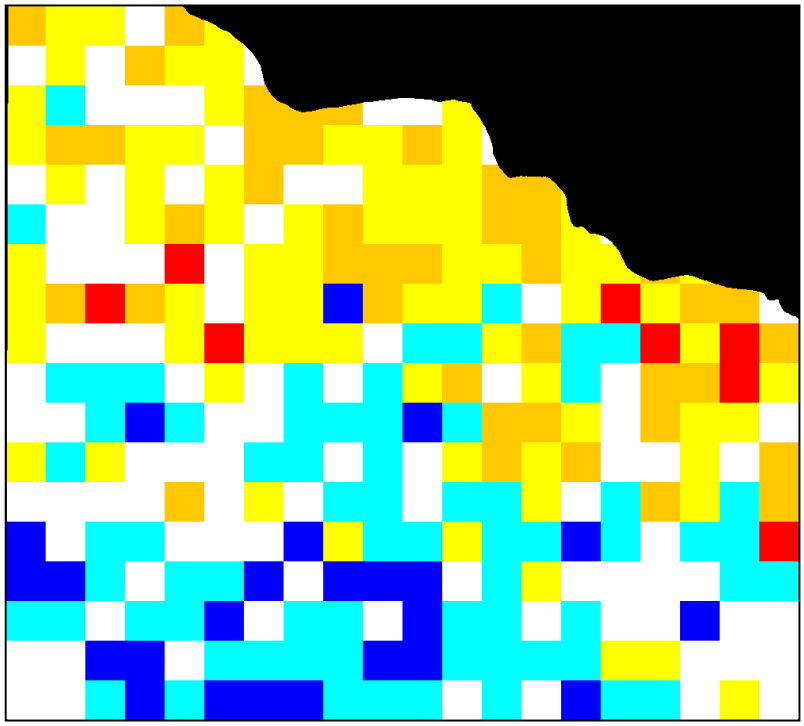


FIGURE 16 Différence des classes d'intensité : image radar moins photo-interprétation. *Difference in the intensity classes: radar image minus photointerpretation results.*
Rouge = +3 ; orange = +2 ; jaune = +1 ; blanc = 0 ; bleu = –1 ; bleu foncé = –2

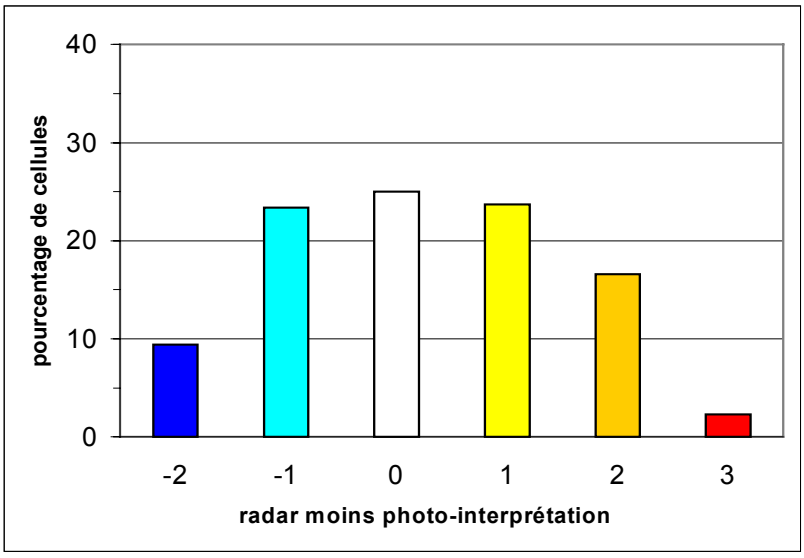
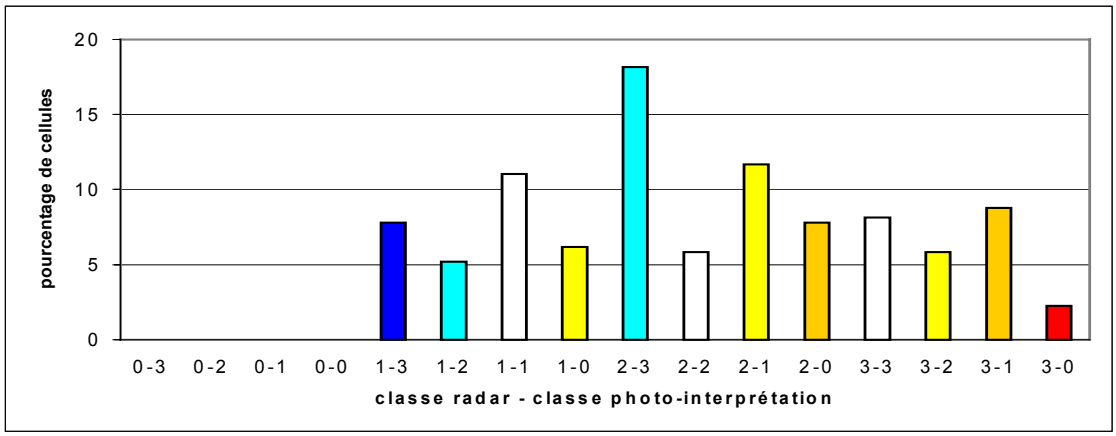
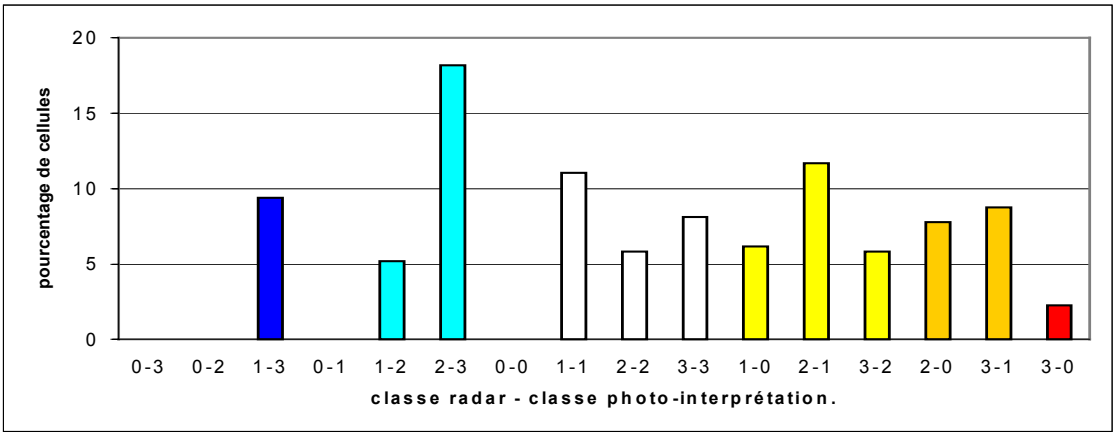


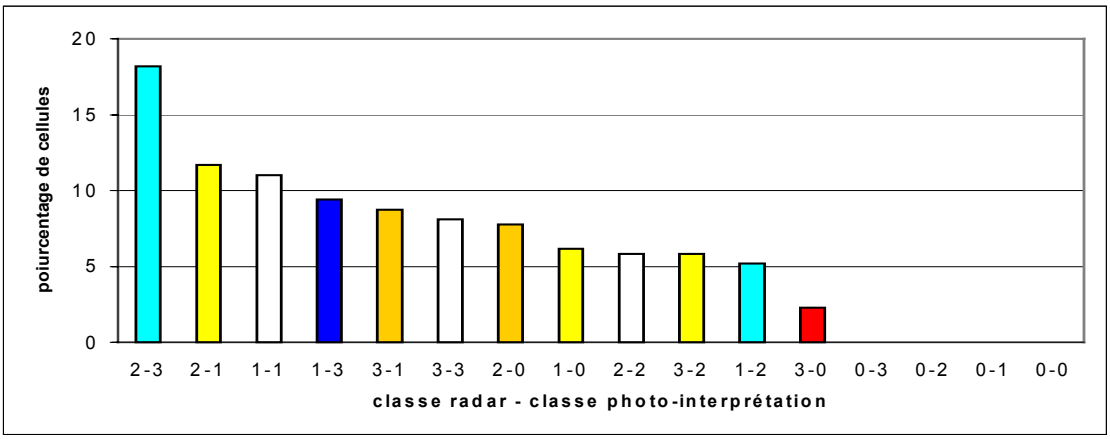
FIGURE 17 Pourcentage de cellules pour chaque niveau de différence d'intensité entre le traitement de l'image radar et le résultat de la photointerprétation. *Percentage of the cells for each difference level of intensity between the radar image and photointerpretation results.*
Bleu foncé = –2 ; bleu = –1 ; blanc = 0 ; jaune = +1 ; orange = +2 ; rouge = +3.



a) Par ordre croissant de classe d'intensité



b) Par ordre croissant de niveau de différence



c) Par ordre décroissant de pourcentage de différence

FIGURE 18 Différence entre les classes d'intensité entre le traitement de l'image radar et le résultat de la photointerprétation. *Difference between the intensity classes based on the radar image and the photointerpretation results.*
Bleu foncé =–2 ; bleu = –1 ; blanc = 0 ; jaune = +1 ; orange = +2; rouge = +3.

Une cause de cette disparité de différence d'intensité est la présence, au nord, sur l'image radar, de zones de très faibles valeurs numériques qui correspondent à l'ombre du radar crée par les parois des canyons (figure 10). Sur la carte d'intensité karstique provenant de l'image radar, ces zones d'ombre sont classées moyennement ou fortement karstiques. Or, sur la carte d'intensité karstique produite à partir de la photo-interprétation, ces mêmes cellules sont classées non karstiques à faiblement karstiques. L'effet de ces zones d'ombre est d'augmenter la densité des cellules qui les superposent, mais surtout d'augmenter leur superficie. Globalement, ces différences représentent moins de 15 % de l'ensemble. La disparité nord-sud de la répartition des différences est visible aussi bien sur les cartes des différences des niveaux de densité que de superficie (figures 12 et 14).

5. DISCUSSION DES RÉSULTATS

5.1. Validité des résultats

Sur le tableau 8**,** on résume les sources d'erreurs possibles lors de la photointerprétation et du traitement d'image avec leur niveau d'influence.

5.1.1. Photointerpétation

Lors de la photointerprétation, des erreurs peuvent se produire pendant les trois étapes d'acquisition des données : traçage des dépressions sur les calques, assemblage des calques en mosaïque et numérisation des dépressions.

Lors du traçage des dépressions, la précision de leur contour influence leur taille. Grenier (1993) a effectué un calcul de variation des mesures, à partir du traçage avec un crayon aiguisé, pour des photographies aériennes dont les échelles vont du 1 : 6 000 au 1 : 15 840. L'erreur planimétrique sur des photographies aériennes à l'échelle du 1 : 40 000 est de 3,8 mm, donc de 152 m sur le terrain. Mais l'importance des erreurs est jugée négligeable puisque leurs valeurs tant positives que négatives s'annulent.

Lors de la deuxième étape, un manque de précision géographique peut entraîner une mauvaise localisation de certaines dépressions. Dans ce cas, une dépression située à la périphérie d'une cellule de la grille d'échantillonnage augmenterait artificiellement la densité ou la superficie de la cellule. Ce type d'erreur est jugé faible puisque la mosaïque a été faite en superposant les calques sur la carte topographique et que l'erreur est limitée à la périphérie des cellules.

La numérisation des calques provenant de la photointerprétation à l'aide de la souris de numérisation entraîne obligatoirement une variation de ce contour par rapport au tracé original. La conséquence est un changement dans la superficie des dépressions. Cependant l'importance de ces erreurs reliées à la précision de la table numérisante (0,254 mm) est jugée minime en plus d'être négative et positive.

5.1.2. Traitement de l'image radar

Des erreurs peuvent aussi survenir au cours du traitement de l'image.

La première source d'erreur possible est liée à la correction du patron d'antenne. Cette correction modifie les valeurs brutes de l'image et, en conséquence, les analyses de texture ainsi que les classifications de l'image en subissent les effets.

Une deuxième source d'erreur possible peut se produire lors de la création des signatures utilisées pour la classification. Dans notre cas, la distinction des signatures étant supérieure à 95 %, cette source d'erreur est jugée minime.

Durant l'étape de la classification, si la taille de la fenêtre de l'analyse de texture n'est pas optimale, il en résulte une diminution de la précision de la classification. Cette erreur est jugée nulle puisque la variance a été vérifiée pour chaque taille de fenêtre avant que ne soient effectuées les analyses de texture.

Durant l'étape de la classification, il est aussi possible que les pixels de plusieurs classes aient les mêmes caractéristiques, ce qui crée une confusion lors de l'attribution des classes. Par exemple, sur l'image, les tourbières pouvait être confondues aisément avec les zones de faible rétrodiffusion situées dans la forêt boréale. Le même phénomène pouvait se produire avec les plans d'eau et les zones d'ombre de radar. Normalement, les zones d'ombre de radar ont des niveaux de gris de 0 (aucune rétrodiffusion). On aurait alors pu corriger cette confusion en bloquant les valeurs de 0 lors de la classification et en les attribuant automatiquement à la classes ombre de radar. Sur le tableau 9, on montre que, sur l'image radar, les valeurs des pixels correspondant à l'ombre de radar ne sont pas tout à fait de 0 et qu'elles sont effectivement similaires à celles des plans d'eau. La conséquence de ces zones d'ombre est d'augmenter, sur la carte issue du traitement de l'image radar, la densité et aussi la superficie des cellules touchées. Dans les deux cas, un angle d'incidence moins grand, l'utilisation d'images radar ayant des angles de visée différents ou l'utilisation d'un modèle numérique d'altitude auraient permis de minimiser la confusion des classes.

TABLEAU 8 Résumé des erreurs possibles dans les résultats de la photointerprétation et du traitement de l'image radar. *Resume of the possible errors in the results from the photo-interpretation and the radar image.*

	Étape	Type	Cause	Effet	Importance	Justification
Photo-interprétation	Traçage	Imprécision dans le traçage	Augmentation ou diminution de la superficie des dépressions	Variation du niveau de superficie des cellules	Négligeable	erreur tend à s'annuler et ne peut être d'une grande importance
		Oubli ou erreur d'identité	Augmentation ou diminution du nombre de dépressions	Variation du niveau de densité des cellules	Idem	idem
		Inégalité dans la précision	Augmentation du nombre et de la superficie des dépressions	Augmentation du niveau de densité et de superficie des cellules	Idem	effet hypothétique et sur de petites zones
		Séparation ou union	Idem	Idem	Idem	idem
	Mosaïque des calques	Erreurs de localisation	Transfert de superficie et/ou densité d'une cellule à l'autre	Variation relative du niveau de superficie ou de densité de cellule voisines	Faible	technique utilisée n'est pas la plus précise mais limitée au pourtour des cellules
	Numérisation	Imprécision dans la numérisation	Augmentation ou diminution de la superficie des dépressions	Variation du niveau de superficie des cellules	Négligeable	erreur tend à s'annuler et ne peut être d'une grande importance
		Oubli ou union	Augmentation ou diminution du nombre de dépressions	Variation du niveau de densité des cellules	Idem	idem

	Étape	Type	Cause	Effet	Importance	Justification
Traitement d'image radar	Correction radiométrique	Mauvais algorithme	Mauvais niveaux de gris	Erreurs de classification	Négligeable	Les corrections sont mineures donc l'erreur est en conséquence
	Signatures	Mauvais masques	Mauvaise distinction	Confusion possible des classes karstiques et non karstiques	Négligeable	Vérifiable avant la classification
	Classification	Mauvaise taille du filtre de texture	Idem	Idem	Nulle	Idem
		Confusion sur l'identité d'un pixel (ex : tourbières et zones de faible rétrodiffusion)	Erreur sur l'identité d'un pixel	Variation de la densité et la superficie	Importante	Vérifiable avec les résultats de la classification
	Ombre de radar	Zones non atteintes par l'onde	Perte d'information	Confusion de classes, erreurs dans le niveau de densité et superficie	Variable	Vérifiable avec la comparaison de l'image radar et la photo-interprétation
	Correction géométrique	Mauvais points de contrôle ou algorithme	Erreur de localisation	Variation relative du niveau de superficie ou de densité de cellules voisines	Faible	Vérifiable avec l'erreur résiduelle quadratique
Sources des données	Dates d'acquisition	Différence de dates d'acquisition des données	Variation de la superficie ou de la densité	Variation inégale du niveau de superficie et/ou de la densité	Faible	16 ans de différence ne sont pas suffisants pour générer des changements majeurs

TABLEAU 9 Moyennes et écarts types des valeurs numériques de masques d'ombre de radar et de surfaces d'eau de l'image radar. *Averages and standard deviations of the numerical values of masks of shade of radar and water surfaces of the image radar.*

Masques	Moyennes	Écarts types
Ombre de radar	2,2	2,0
	3,9	2,7
	2,9	3,2
	Moyenne = **3,0**	Moyenne = **2,6**
Plans d'eau	2,9	2,6
	3,4	2,1
	3,2	2,6
	Moyenne = **3,2**	Moyenne = **2,4**

5.1.3. Conclusion

Nous avons vu que les sources d'erreurs ont une influence relativement faible sur les résultats. La source d'erreur la plus importante est la confusion qu'il y a entre certaines classes sur l'image radar, néanmoins elle est inférieure à 5 %.

La similarité entre la classe de tourbières et les zones de faible rétrodiffusion dans la forêt boréale nécessite de bonnes signatures numériques afin de minimiser cette confusion. La confusion entre les zones d'ombre de radar et les plans d'eau représente la source d'erreur la plus importante. Les erreurs reliées à ces deux situations s'accentuent au fur et à mesure que l'angle d'incidence du radar augmente, c'est-à-dire lorsqu'on se dirige vers le nord de la zone d'étude. Sur la carte de différences d'intensité karstique (figure 16), la disparité nord-sud entre la répartition des cellules positives et négatives est principalement causée par cette confusion entre les classes, notamment entre l'ombre de radar et les plans d'eau.

5.2. Discussion des résultats

En considérant qu'un niveau de différence de l'intensité karstique de ± 1 est acceptable, il y a 72,5 % des cellules de la carte d'intensité karstique provenant du traitement de l'image radar qui sont similaires à celles provenant de la photo-interprétation. Puisqu'il s'agit d'une nette majorité, on considère que le résultat final est très bon. Ceci signifie que les formes karstiques affectent significativement le signal rétrodiffusé des ondes radar et qu'elles permettent ainsi d'établir une cartographie du niveau de risque. Toutefois, 28,1 % des cellules possèdent un niveau de différence important (± 2 et ± 3) sur les deux cartes d'intensité. De plus, la répartition des niveaux de différence d'intensité karstique tant négative que positive n'est pas uniforme.

Cette évaluation s'appuie sur l'hypothèse secondaire qui stipule que la photointerprétation constitue une réalité de terrain représentative. Ainsi, les différences d'intensité karstique ne sont pas nécessairement dues à des omissions ou à des présences puisque l'image radar peut apporter des informations supplémentaires non cartographiables par photointerprétation. Dans les travaux effectués sur la cartographie des réseaux de drainage (McCoy, 1969 ; Parry *et al.*, 1980), on constate qu'une partie des tributaires ne sont visibles que sur l'image radar. La présence de dépressions sur l'image radar, alors que celles-ci sont absentes sur le produit de la photo-interprétation, n'implique pas nécessairement qu'il y a une erreur de classification mais que ces dépressions peuvent êtres difficiles à distinguer par photo-interprétation. Ainsi, l'erreur liée au traitement de l'image radar est comparable à celle de la photographie aérienne, puisque la résolution spatiale de l'une est comparable à l'échelle de l'autre.

La correction géométrique de l'image radar a été effectuée avec une précision optimale (1,5 pixels). Quelques tests ont permis de confirmer que la taille des fenêtres, pour les analyses de textures, est effectivement optimale à 11 × 11. Les signatures spectrales ont nécessité une attention particulière. Dans le cas contraire, la confusion entre les classes était importante, notamment entre les tourbières et les zones de faible rétrodiffusion. Il est à noter que l'ajout d'une seconde analyse de texture pour la classification n'a augmenté de façon significative le niveau de précision de la classification. Ce résultat est en accord avec celui de Ulaby *et al.* (1986) sur la classification d'images radar à l'aide d'analyses de texture.

L'utilisation de photographies aériennes à l'échelle du 1 : 15 000 a eu comme effet de rendre

inégale la précision de la classification mais on en a jugé l'impact négligeable. L'échelle du 1 : 40 000 des photographies aériennes est compatible avec la résolution spatiale de l'image radar. L'angle d'incidence du capteur est jugé trop élevé. Les zones d'ombre et de faible rétrodiffusion occasionnent de la confusion entre les classes karstiques et non karstiques. Ce dernier aspect de l'image a eu un impact négatif significatif sur les résultats. Le combiné de ces facteurs contribue à augmenter cet effet d'inégalité de la répartition des différences de classes d'intensité.

5.3. Discussion en lien avec les travaux antérieurs

À notre connaissance, aucune étude n'a porté à la fois sur la cartographie des géorisques et l'utilisation d'images radar. La présente étude constitue donc une innovation qui ouvre les portes sur un nouvel outil de cartographie. Plus spécifiquement, on peut maintenant automatiser les techniques en utilisant des cartes avec une grille d'échantillonnage et des niveaux de géorisque par cellule. La dimension de la grille et le mode de répartition dans les niveaux karstiques sont maintenant calculés de façon objective. De plus on se sert de la densité ainsi que la superficie en calculant l'intensité karstique. Cette façon de faire représente une amélioration importante en comparaison avec celles d'Adams et Lovell (1984), de Brook et Alison (1983), de Smith et Tribble (1979), d'Upchurch et Littlefield (1987) ainsi que de Wilson et Beck (1988). Finalement, la combinaison du repérage des données par analyse numérique d'image et de la validation des résultats par une méthode indépendante permet de bonifier la carte du géorisque karstique sans réduire indûment le niveau de précision des résultats.

En terminant, la présente étude a la particularité d'avoir combiné deux sujets d'étude en les développant d'avantage, soit le développement d'une méthode de cartographie des géorisques karstiques, puis l'évaluation de la détection des formes karstiques de surface à l'aide d'image radar ainsi que l'utilisation de ces données afin d'effectuer ladite cartographie.

6. CONCLUSION

La méthode développée a permis d'aboutir à un outil de reconnaissance des sites karstiques. Les cartes ainsi produites permettent de distinguer les zones de forte karstification des zones de faible intensité karstique. Il est alors possible d'identifier les zones d'intérêt afin d'effectuer des investigations détaillées supplémentaires. Pour la construction d'infrastructures, on évitera les zones de forte intensité karstique. À l'inverse, ces dernières seront les zones d'intérêt lorsqu'on recherche pour de bons aquifères, par exemple.

La technique de cartographie des géorisques développée, présente plusieurs avantages pour les applications dans ce domaine. Le mode de classement des cellules de la grille d'échantillonnage, à partir de la densité et de la superficie des dépressions, est relativement simple à appliquer. Le fait de déterminer la dimension des cellules de la grille d'échantillonnage ainsi que le mode d'attribution de la classe d'intensité karstique à chacune des cellules, les données étant linéaires ou non, signifie que cette méthode peut être appliquée sur des zones où le développement karstique est différent de la zone d'étude actuelle.

Une évaluation de l'angle d'incidence le plus approprié doit être faite afin de minimiser l'effet de l'ombre de radar. Plus la topographie est plane, plus l'angle d'incidence peut être grand (50°) afin que les micro-variations crées par les dépressions se démarquent sur l'image radar. Si l'angle d'incidence est trop élevé (70°), l'ombre de radar occasionnera une perte d'information.

Puisque les données sont traitées comme étant des surfaces dont on délimite le nombre et la superficie des entités, il est possible d'appliquer la technique de cartographie sur n'importe quelles données géographiques qui ont la même structure.

Pour éventuellement améliorer la technique développée, il serait judicieux d'effectuer certaines études et de comparer les résultats exposés dans le présent document. Ainsi, la technique de cartographie des géorisques a été développée pour qu'elle puisse être adaptée à d'autres zones karstiques. Comparer les résultats obtenus ici avec ceux provenant de karsts situés dans d'autres régions géographiques permettrait de confirmer la méthode d'analyse spatiale et les résultats généraux.

Pour circonscrire le problème provoqué par l'ombre du radar, l'utilisation d'un couple d'image ayant des visées opposées pourrait avoir le même effet sur la cartographie du karst. L'amélioration de la classification, dans le cas où l'expression topographique serait importante, peut aussi être faite en intégrant un modèle numérique d'altitude aux données radar.

Remerciements

Nous remercions Daniel Bossé, Hervé Dandjinou et Minh-Nghia Nguyen pour leur support en informatique ou en SIG, Pierre Lanciault pour l'utilisation de son logiciel ainsi que le Centre canadien de télédétection pour l'accès aux données et sa contribution financière, ce qui a permis de présenter le projet et ses résultats lors des colloques ADRO.

Références

Adams, F.T. and Lovell, W. (1984) Mapping prediction of limestone bedrock problems. Transportation Research Record, n° 978, p. 1-5.

Beck, B.F. (1988) Environmental and engineering effects of sinkholes - the process behind the problems. Environmental Geology and Water Sciences, vol. 12, n° 2, p. 71-78.

Brook, G.A. and Allison, T.L. (1983) Fracture mapping and ground subsidence susceptibility modelling in covered karst terrain : Dougherty County, Georgia. *In* P.H. Dougherty (réd.). Environmental karst. Editions GeoSpeleo, Cincinnati, p. 91-108.

Chassé, P.-A. (1999) Logiciel personnel DCOMPTE. Département de géographie et télédétection, Université de Sherbrooke, Sherbrooke.

Côté, D. Dubois, J.-M.M. et Gwyn, Q.H.J. (1990) Les lacs mystérieux de l'île d'Anticosti. GEOS, vol. 19, nº 3, p. 20-25.

Dubois, J.-M., Gratton, D. et Marceau, D. (1984) Les régions naturelles du Québec : L14, l'île d'Anticosti. Département de géographie, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 33 p.

Dubois, J.-M., Gwyn, H., Bigras, P., Gratton, D., Painchaud, A., Perras, S. et St-Pierre, L. (1990) Géologie des formations en surface, île d'Anticosti, Québec. Commission géologique du Canada, Ottawa, carte 1660A, carte au 1 : 250 000.

Dubois, J.-M., Gwyn, H., Gratton, D., Painchaud, A., Perras, S. et Cadieux, D. St-Pierre, L. et Bigras, P. (1985) Géologie des formations en surface et géomorphologie de l'île d'Anticosti, Québec. Commission géologique du Canada, Ottawa, dossier public n° 1132, cartes au 1 : 50 000.

Ford, D. and Williams, P. (1989) Karst geomorphology and hydrology. Unwin Hyman, London, 601 p.

Forth, R.A., Butcher, D. and Senior, R. (1997) Hazard mapping of karst along the coast of Algrave, Portugal. *in* B.F. Beck and J.B. Stephenson (eds) The engineering geology and hydrogeology af karst terranes. Proceedings of the third multidisciplinary conference on sinkholes and the engineering and environmental impacts of karst, Springfield, Missouri, 6-9 April 1997, A.A. Balkema, Rotterdam, p. 401-407.

Grenier, A. (1993) Évolution littorale et impact des structures artificielles aux Îles-de-la-Madeleine, golfe du Saint-Laurent, Québec. Mémoire de maîtrise, Département de géographie et télédétection, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 275 p.

Lanciault, P. (1997) Logiciel personnel TAXI. Département de géographie et télédétection, Université de Sherbrooke, Sherbrooke.

Long, D.G.F. and Copper, P. (1994) The late Ordovician - early Silurian carbonate tract of Anticosti Island, Gulf of St. Lawrence, Eastern Canada. Geological Association of Canada/Mineralogical Association of Canada, Joint Annual Meeting, Waterloo (Ontario), 1994, Field Trip Guidebook B4, p. 1-67.

Marceau, D., Howarth, P.J. and Dubois, J.-M.M. (1989) Automated texture extraction from high spatial resolution satellite imagery for land-cover classification : concepts and application. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, July 10-14, Vancouver, Canada, vol. 5, p. 2765-2768.

McCoy, R.M. (1969) Drainage network analysis with k-band radar imagery. The Geographical Review, vol. 59, p. 493-512.

Miller, R.L. and Khan, J.S. (1962) Statistical analysis in the geological sciences. John Wiley & Sons, New York, 483 p.

Nezry, E., Beaudoin, A. and Lopes, A. (1993) Preprocessing of mutifrequency SAR images : application to geological study of karstic formations (Le Larzac-France). International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'93), Tokyo, Japon, 18-21 août, p. 2135-2137.

Paré, G. (2000) Cartographie des géorisques karstiques à l'aide d'images radar : application à l'île d'Anticosti, Québec. Mémoire de maîtrise, Département de géographie et télédétection, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 175 p.

Parry, J.T., Wright, R.K. and Thomson, K.P.B. (1980) Drainage on multiband imagery in the Laurentian area, Quebec. Photogrammetria, vol. 35, n° 1, p. 179-197.

Petryk, A.A. (1981) Carte géologique de l'île d'Anticosti. Ministère de l'énergie et des ressources du Québec, Québec, DPV-823, 14 p.

Roberge, J. (1979) Géomorphologie du karst de la Haute-Saumons, île d'Anticosti. Mémoire de maîtrise, McMaster University, Hamilton (Ontario), 218 p.

Smith, C.H. and Tribble, A.P. (1979) The utilisation of side-looking airborne radar (SLAR) in the analysis of karst topography. Remote Sensing Quaterly, vol. 1, n° 1, p. 49-57.

Sweeting, M.M. (1972) Karst landforms. Macmillan, London, 362 p.

Ulaby, F.T., Kouyate, F., Brisco, B. and Williams, T.H.L. (1986) Textural information in SAR images. IEEE Transaction on Geosciences and Remote Sensing, vol. GE-24, n° 2, p. 235-245.

Upchurch, S.B. and Littlefield, J.R. (1987) Evaluation of data for sinkhole-development risk models. *In* B.F. Beck (réd.) Engineering and environmental applications : Proceedings of the second multi-disciplinary conference on sinkholes and the engineering and environmental impacts of karst. A.A. Balkema, Rotterdam, p. 359-364.

White, W.B. (1988) Geomorphology and hydrology of karst terrains. Oxford University Press, New York, 464 p.

Wilson, W.L. and Beck, B.F. (1988) Evaluating sinkhole hazards in mantled karst terrane. In N. Sitar (réd.) Geotechnical aspects of karst terrains : exploration, fondation design and performance, and remedial measures. Geotechnical Special Publication, n° 14, p. 1-24.