
Le cadre écologique de référence du Québec

Perspectives historiques, concepts et applications

CHAPITRE 2 Concepts, méthode et outils

Jean-Pierre Ducruc

Référence à citer :

Ducruc, J.-P., 2019. « Concepts, méthode et outils », dans Ducruc, J.-P., F. Poisson, V. Gerardin, G. Domon, J. Ruiz et J. E. Medina Mena, *Le cadre écologique de référence du Québec : perspectives historiques, concepts et applications*. Québec, ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, p. 45-80.



CHAPITRE 2

Concepts, méthode et outils

Par Jean-Pierre Ducruc

2.1 Assise conceptuelle

Le territoire est l'objet d'étude du CER. Le territoire, tel qu'il se présente aujourd'hui à nos yeux, est le résultat d'une très longue évolution, à travers le temps, de la géologie et des matériaux superficiels (sols) sous l'influence du climat, en interaction avec le monde vivant l'ayant successivement occupé. Les formes de terrain et leur organisation spatiale souvent révélée par la configuration du réseau hydrographique sont des témoins privilégiés de cette évolution. Elles répondent à deux caractéristiques fondamentales :

- Elles se perçoivent et s'expriment, à la surface de la terre, à divers niveaux de perception (ou à diverses échelles);
- Elles sont une composante essentielle de tout écosystème au sens de Tansley (1935) et de Rowe (1961) puisqu'elles en constituent le support physique.

Le CER appréhende ces deux caractéristiques fondamentales en portant simultanément deux regards (ou visions) distincts, mais complémentaires sur le territoire :

- Une vision holistique
- Une vision écosystémique

La vision holistique embrasse les divers niveaux de perception des formes de terrain et de leurs arrangements spatiaux; elle s'attarde sur l'organisation horizontale du territoire et préside à sa représentation cartographique. À chacun des niveaux de perception, la vision écosystémique s'attarde plutôt sur l'organisation verticale des différentes strates constituant le territoire et sur leurs relations spatio-temporelles, et elle préside à la classification.

« The whole system (in the sense of physics), including not only the organism-complex, but also the whole complex of physical factors forming what we call environment of the biome – the habitat factors in the widest sense [...] It is the systems so formed which, from the point of view of the ecologist, are the basic units of nature on the surface of the earth [...] Our natural human prejudices force us to consider the organism (in the sense of the biologist) as the most important part of these systems, but certainly the inorganic « factors » are also parts – there could be no system without them, and there is constant interchange of the most various kinds within each system, not only between the organism but between the organic and the inorganic [...] In an ecosystem the organism and the inorganic factors [...] are components, which are relatively stable dynamic equilibrium. » (Tansley, 1935).

En conséquence, le CER découpe d'abord des unités spatiales, puis les décrit. Ainsi conçues, les unités territoriales sont des écosystèmes (*basic units of nature on the surface of the earth*, [Rowe, 1993]); elles forment des complexes tridimensionnels que l'on distingue à la surface de la terre à la fois par des arrangements horizontaux d'unités (figure 2.1), par leur stratification verticale et par les changements temporels qui les affectent. Elles sont qualifiées par les variables familières à l'écologie comme le climat, la géologie, le relief, les sols, l'eau, la végétation, la faune, etc. (Zonneveld, 1990).

Ces unités sont le reflet du fonctionnement des écosystèmes et permettent d'évaluer les sensibilités, les potentiels et d'autres capacités de support du territoire.



Figure 2.1. À des arrangements spatiaux aussi différents vont correspondre des sensibilités, des potentialités et des fonctionnements globaux (capacité de support) bien distincts

Contrairement à l'approche par spécialité qui aborde le territoire en sélectionnant une « strate » en particulier (la géologie, les dépôts de surface, les sols, etc.), le CER considère l'hétérogénéité horizontale et verticale globalement, sans que, à priori, une variable ait préséance sur l'autre. Cette approche globale le différencie nettement des autres cartographies du milieu naturel.

Ce n'est pourtant que la façon dont, dans les sociétés traditionnelles, le paysan, le chasseur ou encore le pêcheur percevait son terroir pour en tirer le meilleur profit. Elle se perd dans la nuit des temps depuis le moment où l'humanité a eu conscience de sa dépendance à l'égard de son environnement. Ce n'est que récemment que nous l'avons perdue, lorsque la modernité nous a menés à étudier le monde qui nous entoure de façon analytique, par thème (chaque science prise isolément) (Zonneveld, 1990).

Voyons maintenant plus en détail, ce que sous-tend chacune de ces deux visions.

2.1.1 Vision holistique

La vision holistique du monde, ou *holisme*, tire son nom d'une conception philosophique formulée par Smuts en 1926. Elle s'appuie sur le principe selon lequel un tout – un *whole* – est plus que la somme de ses parties. Chaque *tout* et les éléments qui le constituent s'influencent et se déterminent réciproquement pour former un système relativement équilibré organisé autour d'interrelations (Naveh et Lieberman, 1994). Ce principe donne une configuration et une structure particulières à chaque unité, organise leur association en unité de niveau supérieur et synthétise des éléments de rang inférieur en un tout qui les dépasse. C'est-à-dire, l'univers tend à construire des unités hiérarchiques de complexité croissante à l'image des atomes, des molécules, des organismes, des sociétés, de la terre, jusqu'à la galaxie et au cosmos.

« *The tendency in nature to form wholes that are greater than the sum of the parts through creative evolution.* » (Smuts, 1926).

Weiss (1969) l'applique aux sciences de la nature et écrit : « L'information sur le tout, sur l'ensemble de la hiérarchie, est plus grande que la somme des informations de ses parties. »

Dès 1942, Egler introduit la vision holistique à l'écologie et, avec elle, le concept de l'organisation hiérarchique de la nature. La terre (et même l'univers tout entier) est vue comme une organisation hiérarchique de systèmes stratifiés à niveaux multiples (figure 2.2).

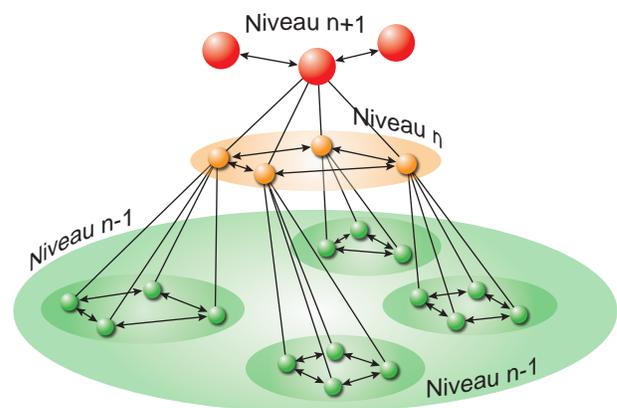


Figure 2.2. Organisation hiérarchique de systèmes stratifiés à niveaux multiples

Attention à l'emploi du terme « hiérarchie » qui, dans la littérature scientifique, est souvent utilisé à tort pour faire référence simplement à un ordre ou un rang selon une échelle linéaire de valeurs. Dans un système hiérarchique, chaque niveau supérieur contient les niveaux inférieurs acquérant ainsi de nouvelles qualités et il est plus complexe que ses subordonnés.

Hormis aux deux extrémités du système, soit le niveau le plus complexe au sommet de la hiérarchie et le niveau élémentaire à la base, on retrouve des structures intermédiaires dans un ordre descendant de simplification, chacune d'elles ayant deux faces regardant en directions opposées. Entre chaque niveau existent des relations de domination ou, à l'inverse, des relations de subordination. La face tournée vers le bas, vers le niveau inférieur, est celle d'un système autonome, tandis que celle qui est tournée vers le haut est celle d'un système dépendant du niveau supérieur. Koestler (1969) a proposé le terme de « *holon* » pour qualifier de telles structures (figure 2.3).

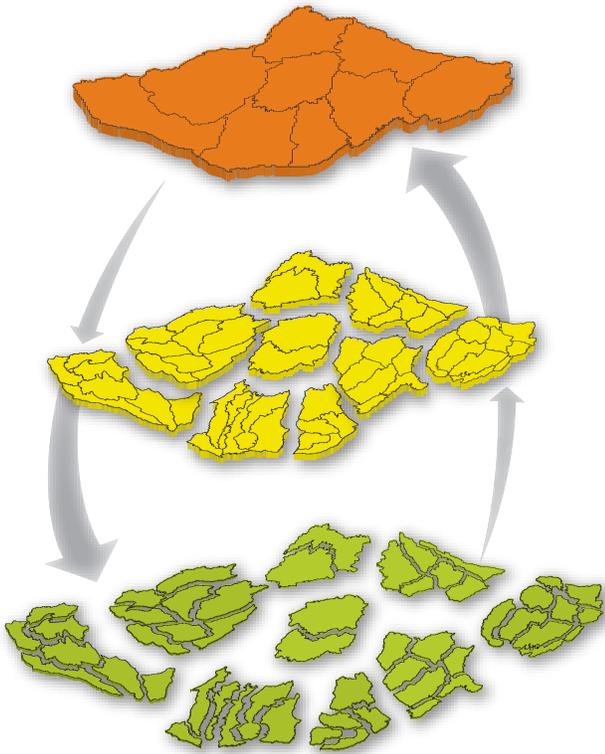


Figure 2.3. *Holons* représentés par les unités du CER

L'organisation et le comportement de n'importe lequel des niveaux d'un tel système hiérarchique ne peuvent être expliqués ou réduits à leurs parties élémentaires, car, comme dans un organisme ou dans une mélodie musicale (figure 2.4), toutes les parties sont interreliées et contribuent activement à son état général (Naveh, 2001, p. 273). On ne peut donc additionner les parties pour reconstruire le tout.

Chaque membre de cette hiérarchie, chaque *holon*, à n'importe quel niveau, est un système capable de fonctionnement autonome et d'autorégulation et il est hétérogène.



Figure 2.4. L'approche holistique vue par Le Chat (Geluck, 2006, reproduite avec permission)

Appliquée au CER, l'approche holistique lui confère les propriétés suivantes (Schultz, 1969) :

- La complexité des niveaux augmente avec le niveau hiérarchique (les plus simples à la base et les plus complexes au sommet);
- Chaque niveau comprend les propriétés du niveau inférieur plus, au moins, une nouvelle propriété émergente;
- Le niveau supérieur ne peut, en aucun cas, être réduit au niveau inférieur;
- Tout niveau contient au complet le niveau inférieur et est, à son tour, tout entier compris dans le niveau supérieur (il n'y a pas chevauchement de limites).

Quel que soit son niveau hiérarchique, chaque unité territoriale est un système écologique ouvert, spatio-temporellement défini (Naveh, 2001) qui entretient des liens étroits avec ses voisines et évolue dans le temps (figure 2.5). Du point de vue cartographique, cela se traduit obligatoirement par une démarche descendante : du haut vers le bas, du général vers le détail. La démarche inverse est inconcevable; elle relève uniquement de la classification des éléments ou des parties de chacun des niveaux (Naveh et Liebermann, 1994, p. 50-53).



Figure 2.5. Plateau accidenté (1) et terrasses du fond de vallée (2), deux unités écologiques reconnaissables sans qu'il soit nécessaire de connaître leurs composantes

2.1.2 Vision écosystémique

Rowe (1961) définit l'écosystème comme *une unité topographique, un volume de terre et d'air, plus un contenu organique (dimension « bio ») qui s'étend sur une partie de la surface terrestre pour un certain temps* (figure 2.6).



Figure 2.6. Illustration de deux écosystèmes distincts au sens de Rowe (1961) : plaine à l'avant-plan et colline montéréjienne au second plan

Cette définition respecte celle de Tansley (1935). Elle met l'accent sur la réalité géographique de l'écosystème qui peut être reconnu, délimité et décrit. Elle amène aussi deux questions fondamentales : 1) Quelles sont les variables qui permettent de reconnaître les écosystèmes?; 2) Comment sont déterminées les limites des écosystèmes?

L'unité topographique à laquelle Rowe fait référence correspond à des assemblages plus ou moins complexes de formes de terrain (le *landform* de la littérature anglaise). Ces formes de terrain, nous l'avons introduit précédemment, sont le produit de processus géomorphologiques successifs agissant sur un matériel géologique original pendant un certain temps, en

interaction avec les variations climatiques successives, dans lequel l'eau joue un rôle majeur comme agent de mise en place et comme élément structurant de l'écosystème. Cette évolution physique est accompagnée d'un développement biologique avec lequel elle interagit pour mener aux caractéristiques actuelles. Comme l'écrit si bien Christian (1959), le *landform* traduit la combinaison interactive dans le temps de la mise en place de la forme du terrain et de sa composante biologique.

Qu'elles soient simples ou complexes, les formes de terrain se définissent, avant tout, par leur morphologie, par la nature géologique du socle rocheux, par la nature et la composition du dépôt meuble, par le dénivelé et la déclivité, par la manière dont elles s'organisent dans l'espace, et le réseau hydrographique en est alors souvent le *révélateur* (figure 2.7). Voilà les variables diagnostiques qui permettent de reconnaître et de délimiter les écosystèmes. Elles induisent aussi la nature des échanges ayant cours au sein de l'écosystème et conditionnent le comportement de l'eau, vecteur essentiel de ces échanges. Les cours d'eau et les lacs sont un peu les veines du territoire!

Le climat actuel n'intervient pas directement dans la cartographie du CER, car il n'est pas une variable génétique de l'organisation spatiale du territoire. Cependant, quels que soient le lieu et le niveau d'observation, le régime climatique qui correspond au rythme quotidien et saisonnier des flux d'énergie et d'humidité contrôle le fonctionnement des écosystèmes (*climate is the driving variable*) (Rowe et Sheard, 1981). Les régimes climatiques suivent une certaine zonalité autour de la terre en fonction de la latitude qui conditionne la quantité d'énergie solaire reçue. La morphologie de la surface terrestre modifie cette quantité d'énergie, mais l'ampleur de la modification change avec l'échelle d'observation; on retrouve ici la notion des niveaux de perception de la vision holistique. De grandes formations de relief comme le Bouclier canadien ou les Rocheuses modifient le climat à l'échelle continentale, des reliefs comme les Appalaches ou les basses terres du Saint-Laurent le modifient à l'échelle régionale et des formes de terrain simples comme des collines, des terrasses ou des vallées interviennent à l'échelle locale. Ensuite, des différences dans la morphologie de ces reliefs vont, à leur tour, moduler la distribution de l'énergie solaire et des précipitations. Même à des niveaux très locaux, à très grande échelle, chaque écosystème jouit d'un microclimat particulier lié à des variables comme l'exposition, la position sur la pente, etc.

En simplifiant à peine, on peut écrire que le climat induit la force et l'intensité des échanges de flux d'énergie et de matière, tandis que la morphologie de la surface terrestre induit la nature de ces échanges.

À l'instar du climat, la végétation, la faune ou l'utilisation actuelle du sol, paramètres dynamiques dans le temps et dans l'espace, n'interviennent pas directement dans la cartographie du CER puisqu'elles ne sont pas non plus des variables génétiques de l'organisation spatiale du territoire. Cependant, ces variables sont intégrées à postériori pour compléter la description des unités cartographiques.



Figure 2.7. Formes de terrain et écosystèmes :

- 1 Fond de vallée : déclivité et dénivelé faibles, dépôts alluvionnaires épais, forêts feuillues;
- 2 et 4 Hautes collines : déclivité et dénivelé élevés, dépôts glaciaires minces et roc, forêts résineuses et mélangées;
- 3 Butte : déclivité et dénivelé moyens; dépôts glaciaires; forêts mélangées

Le CER découpe le territoire en écosystèmes selon un système rigoureux de niveaux de perception hiérarchique (vision holistique) dans lequel toutes les composantes sont liées. Une modification de n'importe laquelle d'entre elles peut entraîner une ou plusieurs modifications dans une autre composante et même dans le fonctionnement du système au complet (figure 2.8). Nous avons là les

bases pour interpréter les interactions possibles entre les diverses ressources ou les différents usages du territoire (agriculture et qualité de l'eau, minéralisation du territoire et régime hydrique, déforestation et érosion des sols, etc.); ces bases permanentes faciliteront aussi les interprétations dans une perspective de changements climatiques.

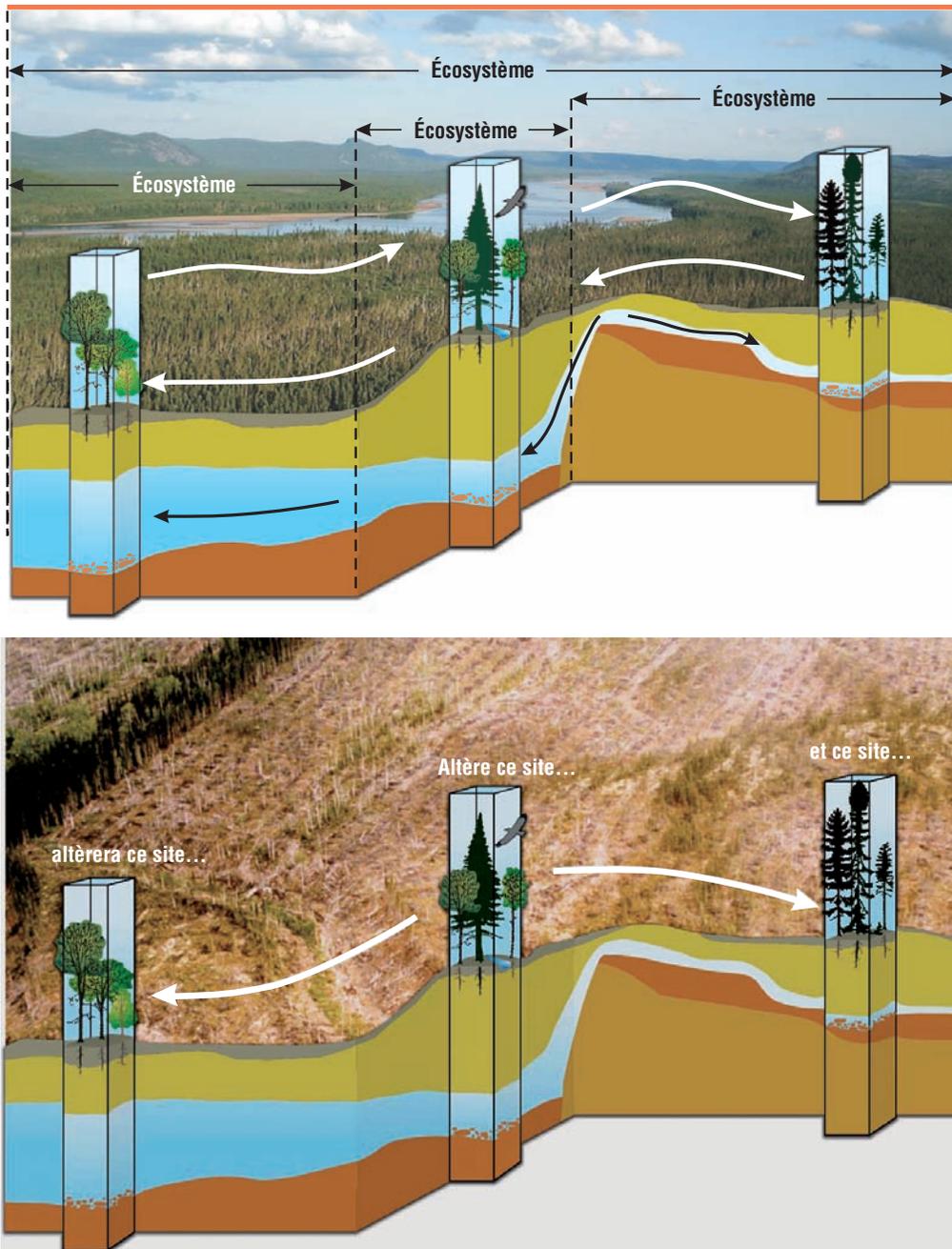


Figure 2.8. Les écosystèmes et leurs composantes sont liés au sein du territoire (adaptée de Bailey, 1996)

Par exemple, des activités forestières ou des activités agricoles en amont peuvent affecter des cours d'eau ou des habitats riverains loin en aval en termes de ruissellement, de transport de sédiments, de mouvement des eaux souterraines, etc. Chaque niveau mémorise l'environnement des écosystèmes du niveau inférieur, acquiert de nouvelles propriétés et, ainsi, conditionne, contrôle en partie et complexifie le comportement et les propriétés du niveau supérieur. C'est pourquoi le fonctionnement d'ensemble d'un territoire diffère souvent grandement de celui de ses écosystèmes pris un à un. Par

exemple, un bassin versant dont une grande partie est déboisée fera en sorte qu'au printemps la neige fondra plus rapidement que sous couvert forestier et affectera la mise en marche et la vitesse du ruissellement. Les interventions en aménagement du territoire se réalisent à divers niveaux de perception : national, régional, local. Le défi est de cartographier les écosystèmes du territoire au niveau et à l'échelle appropriés. Le recours à un système hiérarchique permet de choisir le niveau de perception adéquat selon les objectifs d'utilisation projetés, sans perdre de vue la réalité globale dans laquelle il s'inscrit.

2.1.3 Classification et cartographie

Revenons sur la dualité déjà évoquée de la classification par rapport à la cartographie. Les articles bien étayés de Grigg (1965) et Bailey et ses collaborateurs (1978) serviront de toile de fond. Dans son acceptation la plus stricte, classier signifie arranger ou ordonner des objets en groupes ou en ensembles sur la base de leurs ressemblances ou de leurs relations; la classification produit des classes d'objets semblables (figure 2.9a). La science de la classification est la taxonomie. Le résultat d'une telle démarche est un système de classification. Ensuite, la reconnaissance ou le placement d'un « objet » dans le système s'appelle l'identification (Sokal, 1974). Une fois identifié, un « objet » peut être délimité sur le territoire : c'est alors la cartographie des objets de la classification (figure 2.9b).

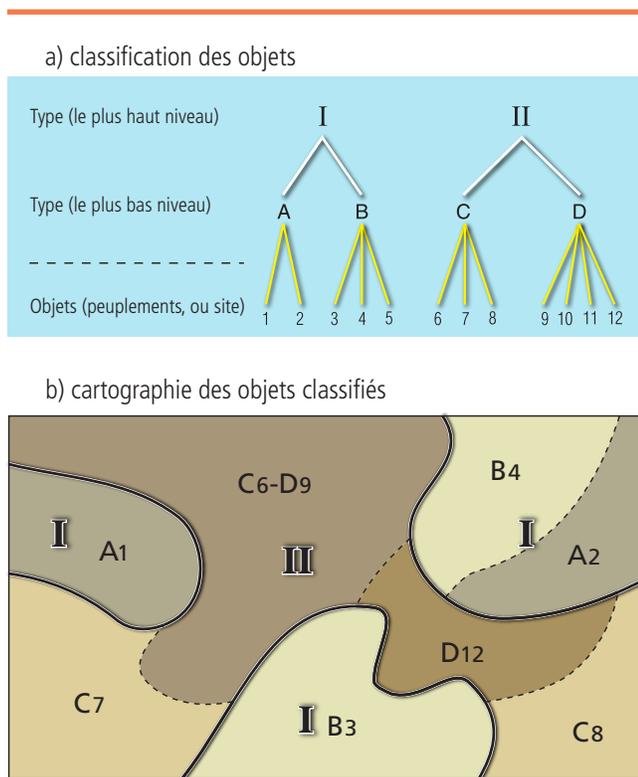


Figure 2.9. La classification selon Bailey et ses collaborateurs (1978)

À l'opposé de la classification, la cartographie subdivise, distingue des objets dissemblables sur le territoire entier visé. Une partie de territoire est reconnue, individualisée et cartographiée, car elle possède un certain nombre de propriétés internes qui contrastent avec celles des parties de territoire adjacent (figures 2.10 et 2.11).

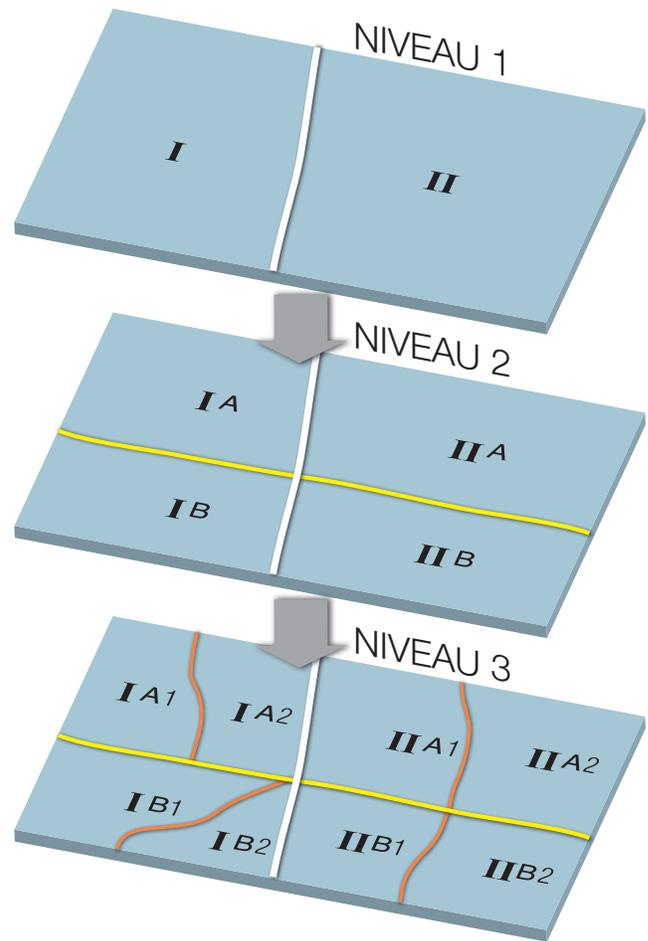


Figure 2.10. La cartographie selon Bailey et ses collaborateurs (1978)

Dans la littérature scientifique, le mot classification est attribué à tous ces aspects prenant au passage un sens très large et passablement flou. Pour ne pas aller à l'encontre de cette tendance générale, nous l'utiliserons ainsi, réservant l'usage de taxonomie (ou classification taxonomique) au sens strict de classification. Il existe beaucoup d'exemples de classifications taxonomiques dans le domaine de la classification des ressources. Certaines s'adressent à des ressources individuelles (faune, flore, sol) tandis que d'autres s'adressent à des stations ou des sites (types de couvert forestier, communautés végétales, types écologiques, etc.).

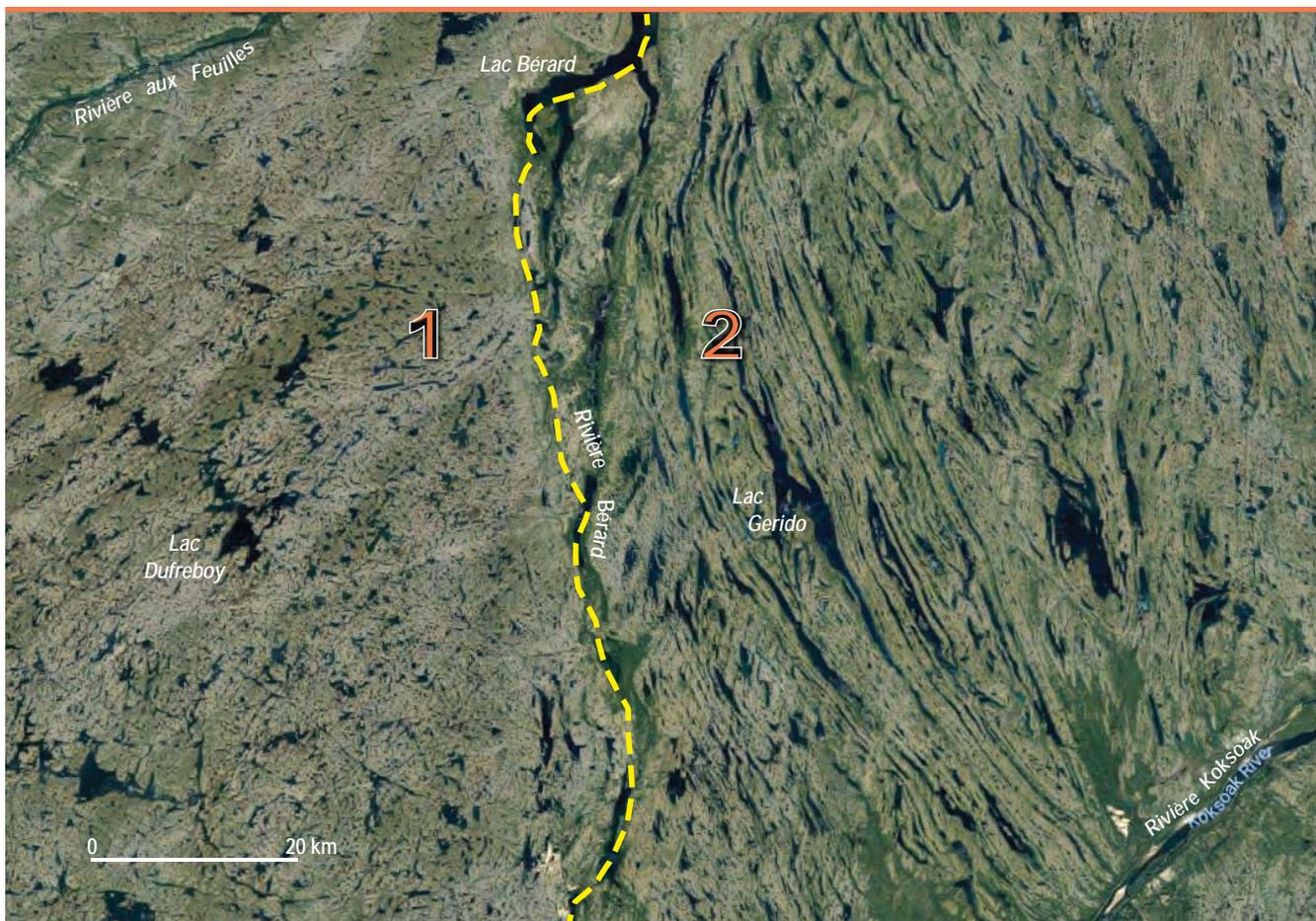


Figure 2.11. La cartographie distingue des objets dissemblables

Chaque polygone cartographique correspond à un système et constitue une parcelle unique de territoire, géographiquement localisée, et à laquelle une dénomination toponymique particulière peut être attribuée. En cela, la cartographie se différencie fortement de la classification, qui relie d'abord la similarité de certains caractères ou de certaines propriétés sans se préoccuper d'affinités géographiques même si, en fin

de compte, tout produit de classification peut aussi être cartographié.

2.2 Principes à la base de la cartographie du CER

La mise en application des deux concepts fondamentaux, vision holistique et vision écosystémique, oblige le CER à respecter les principes majeurs décrits ci-après qui vont guider sa réalisation.

Principe 1

En souscrivant à la vision holistique du monde, *le CER s'inscrit dans un système hiérarchique de niveaux de perception emboîtés de l'espace*. Chaque niveau supérieur contient au complet chacun des niveaux inférieurs qui le composent; il n'y a pas de chevauchements de limites. C'est l'application du système des poupées russes (figures 2.12 et 2.13).

Tout projet de cartographie s'inscrit dans ce système, ce qui exige, lorsqu'on travaille à des niveaux inférieurs de la hiérarchie, de connaître et de considérer les niveaux supérieurs. En effet, ce n'est pas tout de cartographier et décrire un fond de vallée ou un complexe de collines, encore faut-il pouvoir les situer dans les niveaux de perception supérieurs auxquels ils appartiennent. En effet, les relations dynamiques et les propriétés (potentiels, sensibilités) de ces unités seront différentes selon qu'elles se retrouvent dans un complexe supérieur de relief accidenté ou, au contraire, de plaine.

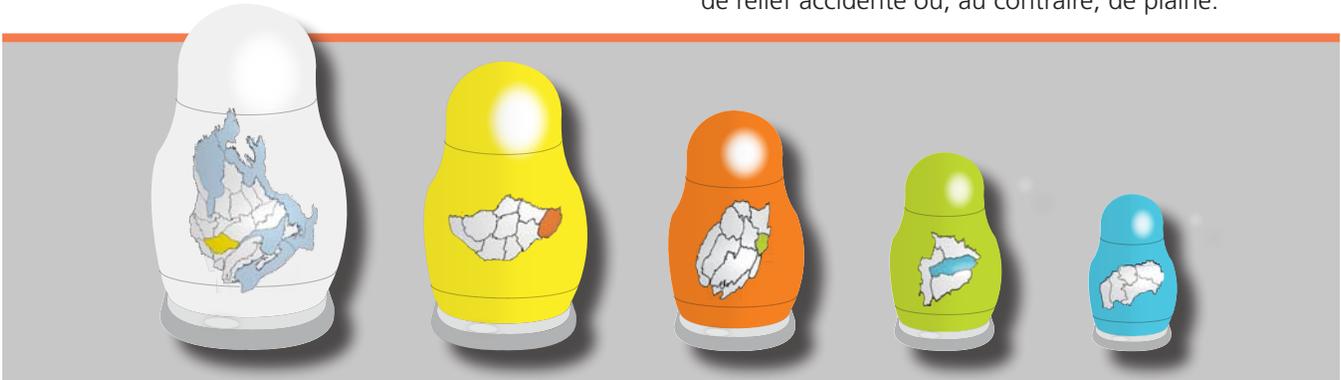


Figure 2.12. Un système hiérarchique de niveaux de perception emboîtés à l'image des poupées russes

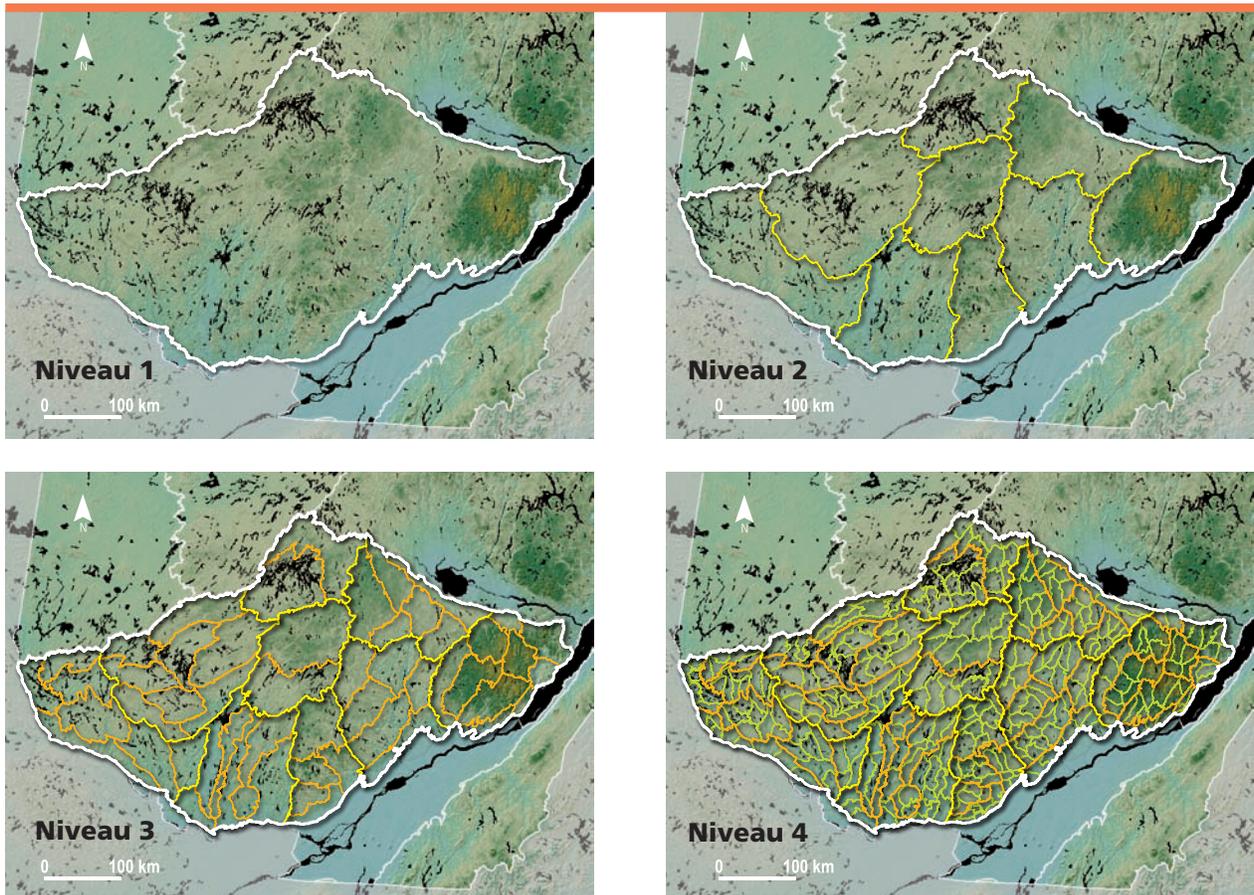


Figure 2.13. Un système hiérarchique de niveaux de perception emboîtés de l'espace (exemple : la province naturelle des Laurentides méridionales)

Principe 2

Le CER considère les formes de terrain et leurs assemblages spatiaux comme le facteur génétique de l'organisation des écosystèmes à la surface de la terre. Elles en traduisent la dimension géographique. La reconnaissance et la cartographie de ces structures spatiales fournissent la clé du fonctionnement et de l'évaluation des écosystèmes, car elles contrôlent les échanges de matière et d'énergie dans l'espace et dans le temps sous l'influence du climat ambiant. Elles confèrent

une réalité fonctionnelle aux unités écologiques et permettent d'interpréter les relations dynamiques existant au sein même de l'unité (relations du haut vers le bas : émission, transmission, accumulation) ou entre les unités (relations amont-aval) (figure 2.14).

Au fur et à mesure que l'on descend dans la hiérarchie, les assemblages de formes de terrain (les structures spatiales) sont de plus en plus simples.



Figure 2.14. Les formes de terrain et leurs assemblages spatiaux constituent le facteur génétique de l'organisation des écosystèmes à la surface de la terre

Principe 3

Reconnaître et cartographier ces structures spatiales est un acte de régionalisation territoriale. Ceci signifie que, quel que soit le niveau de perception, la cartographie aborde le territoire dans son ensemble et le découpe en sous-ensembles en portant une attention particulière aux contrastes et aux discontinuités marquées qui le caractérisent. Ceci signifie, encore une fois, que la connaissance du niveau supérieur est impérativement requise pour cartographier à un niveau de perception

particulier. Aux niveaux supérieurs, la cartographie sépare des portions de territoire sur la base de structures spatiales plus ou moins complexes de formes de terrain et de réseau hydrographique associées, tandis qu'aux niveaux inférieurs, elle séparera plutôt des formes de terrain simples, des éléments topographiques avec des parties de réseau hydrographique (figure 2.15).

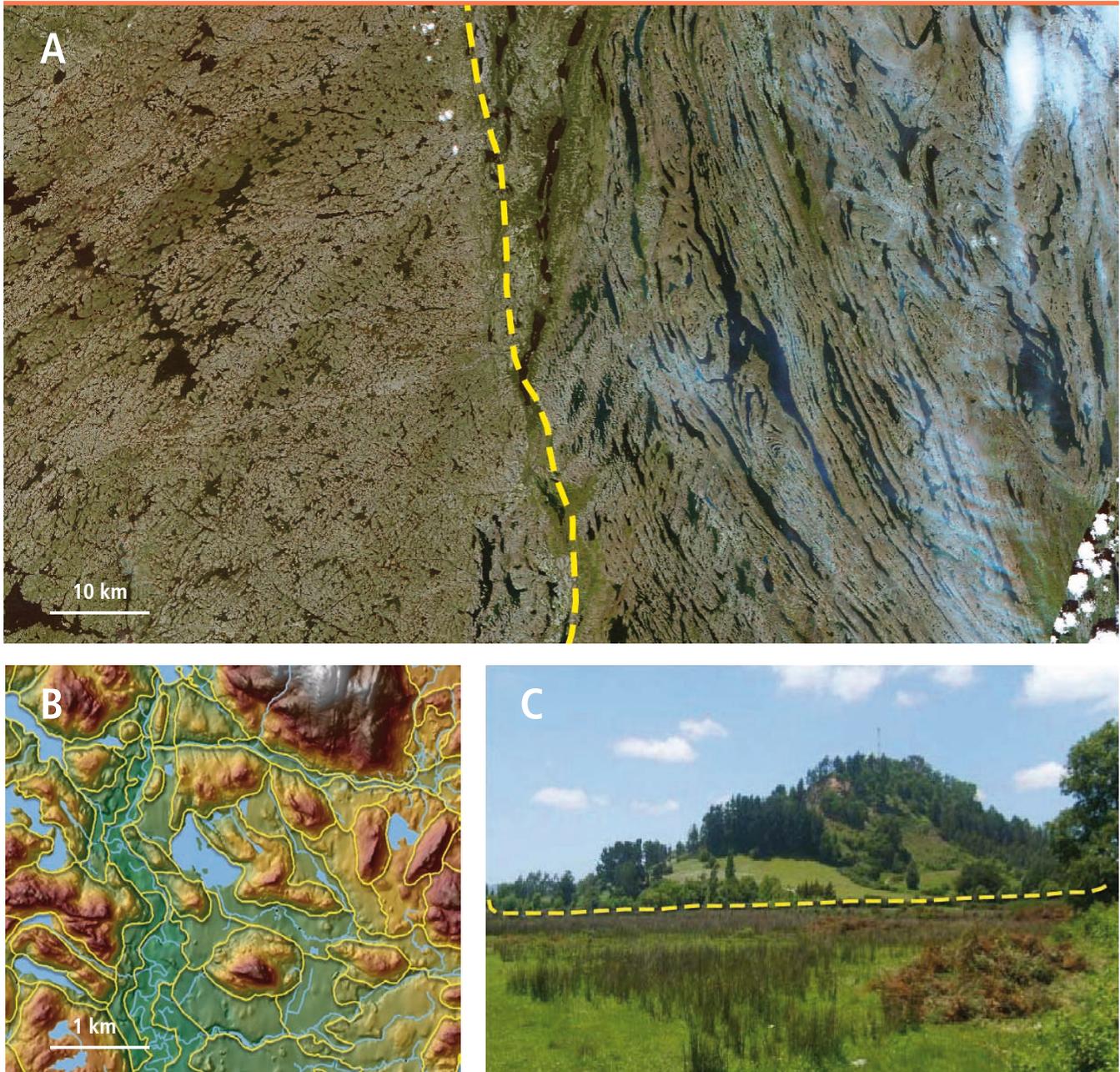
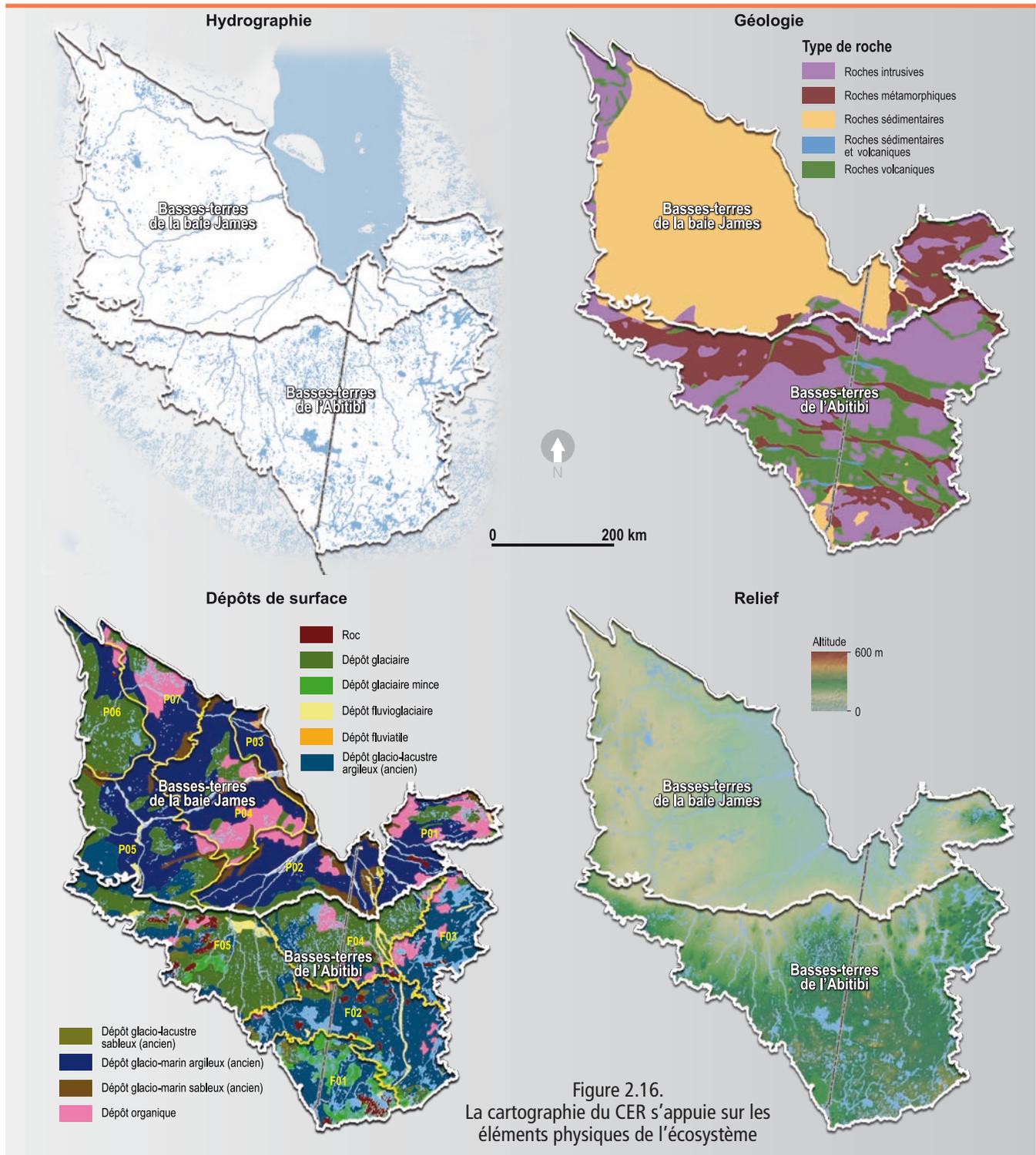


Figure 2.15. De structures spatiales complexes à petite échelle (A) à des formes simples à grande échelle (B) et (C)

Principe 4

Pour cartographier les formes de terrain et les structures spatiales, le CER s'appuie principalement sur les éléments physiques de l'écosystème comme la géologie, la géomorphologie, la configuration, la densité du réseau hydrographique, etc. Ce sont aussi des éléments stables de l'environnement, du moins à l'échelle

humaine, conférant ainsi une certaine permanence à la cartographie réalisée (figure 2.16). Ce trait la distingue des nombreuses cartographies traitant des thèmes dynamiques du milieu naturel comme les cartographies de la végétation, du couvert forestier, de l'utilisation du sol, etc. qui doivent être périodiquement remises à jour.



Principe 5

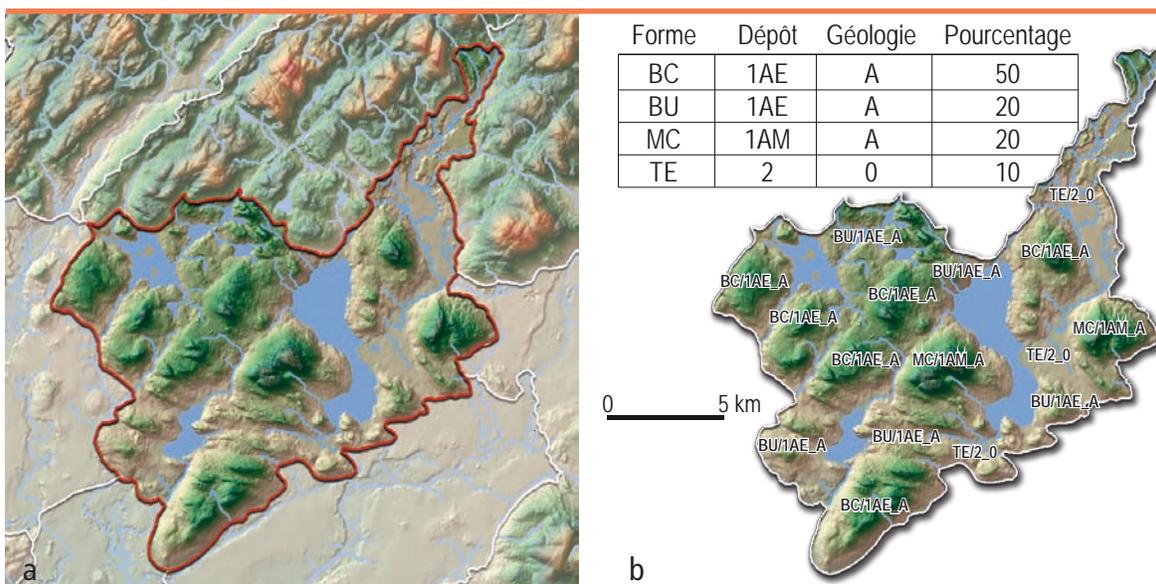
Le cinquième principe pourrait s'énoncer comme suit : « **on ne peut pas cartographier n'importe quoi à n'importe quelle échelle et on ne peut pas non plus tout exprimer à une seule échelle** ». Cet énoncé nous ramène sur les « dérives cartographiques » possibles de la géomatique. Grâce à la technologie, rien n'est plus facile aujourd'hui que de changer d'échelle, de « zoomer » ou « dézoomer » à satiété, de superposer des documents cartographiques initialement produits à des échelles très différentes sans trop se poser de questions sur la légitimité cartographique de tels gestes. Pourtant, une règle d'or existe en cartographie qui veut que lorsqu'on superpose deux cartes d'échelles différentes, le « nouveau » document cartographique ait toujours la valeur de la plus petite échelle. Comme nous le verrons plus loin, l'apport de la géomatique au développement du CER est inestimable, cependant, il ne permet pas de transgresser les règles de base de la cartographie! Produire une carte de la texture de surface des sols pour des applications agronomiques ne se publiera pas au 1 : 1 000 000, pas plus qu'une carte des provinces géologiques ne sera publiée au 1 : 20 000, même si cela est techniquement possible.

À chacun des niveaux, la cartographie s'appuie sur des variables écologiques prépondérantes (ou actives) à ce niveau. Ainsi, à petite échelle, l'histoire géologique joue un rôle primordial, tandis qu'à grande échelle, ce sont plutôt la nature des matériaux meubles (origine, épaisseur, texture ou pierrosité, voire stratigraphie) et des particularités du réseau hydrographique. Ceci signifie aussi que niveaux de perception et variables écologiques prépondérantes ont une échelle d'expression optimale : les niveaux supérieurs à petite échelle et les

niveaux inférieurs à grande échelle et, généralement, la géologie à petite échelle et la texture des sols à grande échelle. Les variables écologiques actives changent aussi lorsque changent les niveaux de perception et leurs classes deviennent de plus en plus étroites en descendant dans la hiérarchie des niveaux. Ainsi, si l'origine des dépôts de surface est suffisante pour qualifier les écosystèmes aux niveaux supérieurs (dépôts glaciaires, fluvio-glaciaires, marins), la nature (moraine de fond, moraine frontale, esker, plaine d'épandage) devient nécessaire aux niveaux intermédiaires et la texture, la pierrosité et la stratigraphie (sable fin sur argile, sable grossier pierreux, till délavé sur till de fond loameux), aux niveaux inférieurs. L'échelle d'expression cartographique suit aussi la précision des classes.

Principe 6

Chaque niveau de perception est hétérogène (on pourrait même écrire « **crée sa propre hétérogénéité** »), même si les formes de terrain ou les éléments du réseau hydrographique sont de plus en plus simples en descendant dans la hiérarchie. Chaque niveau reste cependant un *tout* et constitue un système d'interrelations complexes. C'est pourquoi, en descendant dans les niveaux, on précise davantage les classes de la majorité des variables actives et, ce faisant, on se retrouve chaque fois devant une nouvelle hétérogénéité liée à la nouvelle échelle d'observation. Chaque polygone cartographique (unité spatiale du CER) est accompagné d'une description qui traduit cette hétérogénéité. En pratique, cela signifie que les unités spatiales sont d'abord délimitées et, ensuite, leurs composantes sont décrites : c'est le principe du contenant (le polygone) et du contenu (la description) (figure 2.17).



2.17. Délimitation (a) et description (b) du district écologique des basses collines du lac Saint-Joseph

Ultérieurement, les éléments dynamiques du milieu (végétation, utilisation du sol, faune, données socioéconomiques) vont s'inscrire dans les limites des polygones cartographiques pour compléter la description. Leur apport est essentiel pour les analyses et les interprétations du CER.

2.3 Éléments fondamentaux du découpage cartographique

Même avec l'inestimable apport des nouvelles technologies, l'acte de découpage cartographique du CER demeure surtout le fruit d'une analyse visuelle experte du territoire à partir des « images » mises à la disposition du cartographe. Cela ne signifie pas pour autant que la cartographie écologique n'est que subjectivité et que l'on peut avoir autant de versions que d'interprètes! En effet, pour éviter que deux cartographes ayant un bagage de connaissances différent obtiennent des résultats différents pour un même territoire, l'analyse visuelle est encadrée par des règles rigoureuses, sans pour autant renier qu'au final, une carte restera toujours un produit d'auteur. Il existe donc deux grandes catégories de balises pour guider et encadrer l'acte cartographique. Les premières balises sont inhérentes aux propriétés cognitives de la vision humaine, les deuxièmes font appel aux propriétés de la nature même du CER.

2.3.1 Découpage cartographique et particularités de la vision humaine

La vision d'un objet est une opération complexe résultant d'une étroite coopération entre l'œil et le cerveau. Elle se fait en trois étapes : la mise au point sur l'objet de la vision, la capture de l'image et son analyse. Le cerveau est le système cognitif qui reçoit, traite, conserve et transmet l'information. La façon dont l'image est captée puis traitée joue un rôle déterminant sur la perception que nous en aurons. Trois éléments essentiels retiennent notre attention.

Le regard se déplace en permanence

L'observation et l'analyse d'une image immobile comme une photographie aérienne, une image satellitaire ou une carte se font grâce à un mouvement continu du regard, attiré en premier lieu par des éléments de contraste ou motivé par l'expérience. À chaque phase du regard, le champ de vision nette sur l'image est restreint à un angle de deux à trois degrés (cela correspond à un cercle de 2 cm de diamètre à 50 cm de distance) (Yarbus, 1967; Corbé, 2004). Cette surface est faible par rapport à la surface totale de l'image et la quantité d'informations retenue, bien inférieure à celle présente sur l'image.

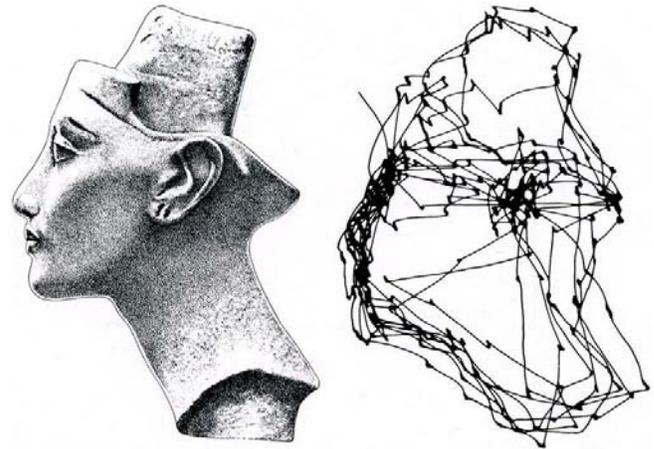


Figure 2.18. L'analyse de l'image nécessite de nombreux déplacements de la vue (Yarbus, 1967, reproduite avec permission)

L'analyse complète de l'image nécessite de nombreux déplacements de la vue (figure 2.18) et de nombreuses informations à « enregistrer »; au-delà d'un certain seuil, le cerveau devient « saturé » et ne peut plus « enregistrer » de nouvelles informations. Il faut donc s'attarder à l'essentiel pour être capable de bien l'« absorber »!



Figure 2.19. Cercle de Wertheimer-Koffka : exemple d'illusion d'optique; les demi-beignes séparés semblent avoir un niveau de gris différents

La vision ne reconnaît pas n'importe quoi

Lorsque nous observons une image, notre système visuel est plus sensible à des ruptures de densité qu'à des différences de densité; il distingue plus facilement des contrastes marqués que des modifications progressives (Yarbus, 1967; Corbé, 2004) (figure 2.19).

On ne voit bien que ce que l'on a déjà vu

L'être humain ne reconnaît sans effort que ce qu'il a déjà préalablement analysé. L'augmentation de ses automatismes visuels et de sa capacité d'analyse va reposer sur la création mentale d'« une bibliothèque de références » construite peu à peu par la logique et le travail en accumulant mémoire et expérience (Yarbus, 1967; Corbé, 2004).

De ces trois caractéristiques de l'acuité visuelle, nous tirons trois enseignements majeurs pour le découpage cartographique du CER :

Trop de détails nuisent!

Il est impératif, à tout niveau de perception, de travailler avec des images du territoire (photographies aériennes, images satellitaires, modèles numériques d'altitude, cartes thématiques) à une échelle appropriée et d'éviter à tout prix la surabondance de détails. En effet, les prouesses de la géomatique ouvrent généralement grande la porte à une abondance d'informations qui mène le cartographe face à deux dangers contraires aux principes mêmes du CER : 1) faire fi de l'échelle; 2) vouloir tout exprimer à tous les niveaux de perception. Il est en effet bien difficile de se résigner à perdre de l'information! Pourtant, le cartographe devra se discipliner et ne retenir que l'information pertinente au niveau concerné. Il sera aidé en cela aussi par une bonne connaissance des événements qui ont présidé à la mise en place du territoire et qui éclairent la hiérarchie des niveaux de perception (voir plus loin).

Le cartographe distingue bien les ruptures et les contrastes

Ceci va faciliter son travail puisque c'est un des grands principes du CER : *la cartographie aborde le territoire dans son ensemble et le découpe en sous-ensembles en portant une attention particulière aux contrastes et aux discontinuités marquées qui le caractérisent.*

Le cartographe reconnaît mieux ce qu'il connaît bien!

Ceci va jouer d'abord dans la reconnaissance de structures, de formes et de contrastes sur les images, c'est-à-dire sur les bases mêmes de l'acte cartographique. L'expérience est un atout majeur; autrement dit, on ne naît pas photo-interprète ou cartographe, on le devient! La meilleure façon est d'apprendre « sur le tas » en accumulant expérience et travail au sein d'une équipe par un encadrement « serré » de personnes expérimentées et, peu à peu, la logique aidant, la mémoire fera son œuvre! Le travail d'équipe est primordial et garant de succès, car, ici aussi, le tout (l'équipe) est supérieur à la somme des parties (les membres de l'équipe). Ceci nous ramène aux paroles de Stan Rowe déjà évoquées dans l'avant-propos lorsqu'il disait qu'en écologie « on ne pouvait se former qu'en lien étroit avec un maître ».

2.3.2 Découpage cartographique et niveaux de perception

Quel que soit le niveau de perception, l'objet du découpage cartographique est de distinguer des portions de territoire différentes en s'appuyant sur la recherche et la mise en évidence de structures spatiales distinctes. De complexes

à petite échelle (niveaux de perception supérieurs), elles deviennent de simples formes de terrain, voire des positions topographiques à grande échelle (niveaux de perception inférieurs). Rappelons, une fois de plus, que la cartographie du CER s'inscrit dans un ensemble gigogne de niveaux de perception de l'espace : chaque fois que l'on descend d'un niveau, le niveau inférieur est une partie du niveau supérieur dans lequel il est tout entier compris. Donc, hormis pour le premier niveau de la hiérarchie, la cartographie s'effectue toujours dans les limites spatiales du niveau supérieur et elle consiste à en dégager les lignes de force qui caractérisent, au mieux, sa structure interne (son organisation spatiale). Il est donc primordial de s'assurer que les lignes de force que l'on dégage traduisent bien la hiérarchie des niveaux de perception que l'on veut cartographier. On voit bien ici, au-delà des concepts et des principes énoncés plus tôt, l'absolue nécessité d'une démarche descendante, d'une démarche qui part du haut vers le bas.

D'un point de vue pratique, cela signifie que, lorsqu'on aborde la cartographie d'un territoire, on doit d'abord être capable de l'observer et de l'analyser au complet, de l'embrasser « d'un seul coup d'œil »; ensuite, lorsqu'on cartographie à un niveau donné (le quatrième niveau, par exemple), il est nécessaire de travailler avec la totalité du niveau supérieur (le troisième niveau en l'occurrence dans cet exemple). Ces deux conditions doivent être respectées, quel que soit le support de travail utilisé (carte papier, carte numérique, photographies aériennes, images satellitaires, écran de projection, etc.). Ces conditions sont d'autant plus cruciales lorsqu'on aborde de grands territoires et que l'on cartographie les niveaux de perception supérieurs du CER. Elles guident, par le fait même, le choix de l'échelle cartographique avec laquelle travailler.

Depuis que Troll, à la fin des années 1930, a découvert les vertus des photographies aériennes, la vision en 3D du territoire s'est imposée et elle est aujourd'hui considérée comme indispensable pour dégager et représenter les structures spatiales qui le caractérisent (Boucher et coll., 1994). Nous avons déjà souligné que pour cartographier les niveaux de perception supérieurs du CER, nous avons longtemps manqué d'informations et d'outils permettant d'avoir des vues synoptiques. Ce n'est pas la venue des satellites d'observation de la Terre comme GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*) ou NOAA (*National Oceanographic and Atmospheric Administration*) qui a permis de combler cette lacune (Coulombe et Grenon, 1992). En effet, la très faible résolution au sol (1 km) et la trop grande généralisation des informations les rendaient peu utiles pour la cartographie écologique. Une partie des besoins a cependant été comblée avec l'apparition des images satellitaires

dont la résolution au sol est de plus en plus précise (cf. section 2.4, Outils et données). Lorsqu'on combine, à l'aide d'un système d'information géographique, ces produits avec un modèle numérique d'altitude, avec des cartes numérisées du réseau hydrographique, du socle géologique, des dépôts de surface, du couvert végétal, de l'utilisation du sol, etc., la quantité d'informations obtenues est phénoménale! Dans cette situation et contrairement au dicton populaire, l'abondance de biens peut parfois nuire; les risques, pour le cartographe, de se noyer dans les détails sont grands! Son défi majeur est alors de ne pas perdre de vue ce qui caractérise bien le niveau de perception qu'il traite. Le choix de l'échelle de l'image (ou des images) utilisée est primordial.

2.3.3 Découpage cartographique et structures spatiales

Pour répondre à la vision holistique à chaque niveau de perception, le découpage cartographique appréhende le territoire globalement et se base, pour cela, sur la recherche et la mise en évidence d'arrangements spatiaux (figure 2.20). Il est aujourd'hui largement reconnu que la majorité des composantes territoriales suit des patrons spatiaux (*pattern*) qui reflètent la structure physique du milieu.

Les reliefs, les dépôts de surface, les sols, l'eau, etc. ne se répartissent pas au hasard dans l'espace. Ils sont morphogénétiquement liés par l'histoire de leur mise en place. Les processus dynamiques du milieu sont, à leur tour, contrôlés par cette structure territoriale. Leur évaluation s'appuie aussi de plus en plus sur la connaissance des patrons spatiaux et pas seulement sur celle de leurs composantes. Jusqu'à récemment, la description des polygones de la cartographie écologique ne fournissait qu'une liste de ses composantes évaluées en importance d'occupation (le plus souvent en pourcentage). Cette liste nous donnait uniquement un inventaire de l'anatomie des polygones et ne permettait pas de comprendre ni l'agencement de leurs composantes ni leur fonctionnement (Rowe, 1961). Pourtant, un polygone constitué de buttes et de collines parallèles peut avoir la même composition qu'un autre polygone constitué de buttes et de collines fracturées orthogonalement; ces deux structures distinctes vont par contre créer des conditions écologiques différentes, en particulier en ce qui concerne l'écoulement de l'eau! La contribution majeure du CER est d'appuyer son découpage territorial sur la reconnaissance de tels patrons spatiaux, puis d'y rattacher la description des composantes du milieu.

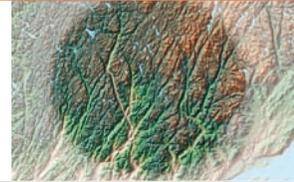
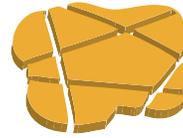
Le cartographe interprète les régularités dans la distribution et la répartition des fractures, bosses, creux, plans d'eau et cours d'eau, etc. que l'image du territoire utilisée offre à sa vue. Il les qualifie d'abord sur le plan horizontal, car c'est la dimension qu'il capte en premier lors de l'analyse visuelle des images. Dans les secteurs fortement contrôlés par le socle rocheux, il s'appuie sur les fractures majeures qui entaillent le territoire jusqu'à son niveau de base. Ailleurs, dans les secteurs où l'influence du socle rocheux est masquée par d'épais dépôts de surface quaternaires, c'est la morphologie propre de ces dépôts qui guide le découpage cartographique. Dans chacun des cas, la configuration du réseau hydrographique est d'un apport majeur : osons le répéter encore une fois, elle est souvent le révélateur de cette organisation spatiale!

2.3.4 Découpage cartographique et connaissance de la genèse du territoire

Le travail du photo-interprète ou du cartographe n'est pas uniquement mécanique ou technique, il exige aussi, au départ, des recherches bibliographiques et des analyses documentaires nécessaires à la compréhension de l'édification du territoire à travers les âges. Il importe de bien connaître l'histoire géologique ou géomorphologique du territoire, car elle permet de comprendre les structures spatiales et l'importance des lignes de force sur lesquelles s'appuie la cartographie. De cette connaissance découlent la logique du découpage des niveaux de perception et le respect de la hiérarchie du CER, sinon la cartographie devient un véritable casse-tête. Meilleure sera la connaissance, mieux fondés seront les critères hiérarchiques et meilleur sera le produit cartographique.

Nous allons l'illustrer à l'aide de trois exemples qui couvrent en partie la grande diversité du territoire québécois. Les deux premiers s'adressent à des territoires fortement contrôlés par le socle rocheux, l'un dans les Laurentides (socle granitique au sein de l'orogénèse grenvillienne), l'autre dans les Appalaches (socle sédimentaire reflet de la mise en place, en orogénèses successives, de la chaîne appalachienne). L'organisation spatiale du troisième, dans les basses terres de l'Abitibi, reflète des épisodes glaciaires et postglaciaires de l'époque quaternaire et exprime davantage le contrôle des dépôts de surface. Dans les trois exemples, le fil directeur du découpage cartographique reste la reconnaissance des structures physiques majeures du territoire. Si la vision 3D demeure primordiale dans leur recherche, elle s'applique toujours en synergie avec d'autres outils et d'autres informations (géologie, dépôts de surface, pentes, images satellitaires, etc.) même si, pour des raisons de présentation, ceci n'apparaît pas toujours très clairement dans le texte.

Structure fracturée : Le socle rocheux est incisé par un système de fractures (linéaments) qui s'entrecroisent à l'occasion et occupent de 10 à 20 % du territoire. Les cours d'eau profitent de ces fractures pour creuser des vallées quasi-rectilignes et étroites. Cette structure s'observe surtout dans l'assise rocheuse fortement érodée du Bouclier canadien de la Province géologique de Grenville.



Structure fracturée parallèle : Les fractures sont de même nature que dans la classe précédente hormis qu'elles sont parallèles à sub-parallèles.



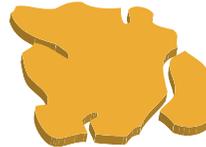
Structure fracturée orthogonale : Le socle rocheux est découpé par deux systèmes de fractures parallèles qui se recoupent à angle droit. Ces fractures, généralement plus larges que dans les deux classes précédentes occupent parfois plus de 20 % du territoire et isolent des blocs quadrangulaires d'interfluves de superficie variable.



Structure complexe : Le système de fractures est désordonné, les plus importantes sont occupées par des dépressions élargies ou des plans d'eau et elles recouvrent souvent plus de 20 % de la superficie. Les formes géométriques des classes précédentes disparaissent et les interfluves ont des dimensions très variables.



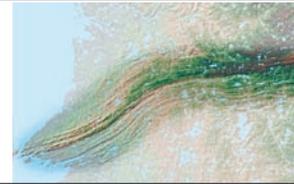
Structure massive : Quelques rares fractures majeures incisent le territoire (moins de 5 %) qui se présente sous forme de blocs de grande superficie.



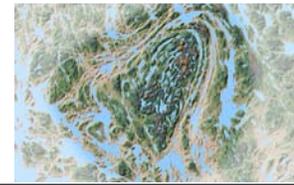
Structure alignée : Surtout présentes dans les formations géologiques plissées (Appalaches, orogène du Nouveau-Québec); les dépressions sont beaucoup plus larges que les fractures qui leur ont donné naissance et elles occupent souvent plus de 20 % de la superficie alors que les interfluves sont de taille modeste, étroits, allongés et alignés.



Structure sinueuse : Présente à peu près les mêmes caractéristiques que la classe précédente hormis la morphologie sinueuse.



Structure courbée : Même caractéristiques générales que précédemment hormis la morphologie courbée (plutôt rare mais tellement remarquable).



Structure parallèle : Une telle structure traduit des formes drumlinoïdes étroites, allongées et quasi parallèles résultat de dépôts modelés par l'écoulement glaciaire. Elles suivent une orientation générale identique mais leur répartition spatiale ne provoque pas forcément d'alignements continus contrairement à une structure alignée. Elle est soulignée par un réseau hydrographique lui aussi parallèle. Elle se distingue de la structure fracturée parallèle contrôlée par des fractures du socle rocheux.

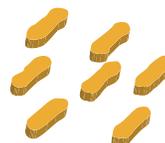


Figure 2.20. Principales structures spatiales

EXEMPLE 1 : Cartographie des ensembles physiographiques (niveau 3) de la région naturelle du massif du lac Jacques-Cartier

La région naturelle du massif du lac Jacques-Cartier fait partie de la province naturelle des Laurentides méridionales (figure 2.21). À première vue, il paraît bien difficile de dégager des structures spatiales cohérentes dans cette région naturelle, car, pour le commun des mortels, tout semble désordre et le chaos y régner en maître! Pourtant, elle porte en elle des témoignages éloquentes de son histoire géologique. Ce sont eux qui doivent guider la reconnaissance des lignes de force structurales du milieu physique et mener à la cartographie du niveau 3 du CER.

Quels sont ces témoignages éloquentes de l'histoire géologique qui ont si fortement imprégné cette région naturelle? Le massif du lac Jacques-Cartier appartient à la province géologique de Grenville. Elle s'est érigée il y a plus d'un milliard d'années, lors d'un épisode orogénique extrêmement compliqué qui a duré plus de 500 millions d'années.

À un moment de cette orogénèse, un microcontinent, Quebecia, est entré en collision avec un bloc continental préexistant, Laurentia (l'ancêtre des Laurentides actuelles). La région naturelle est un vestige de la partie occidentale de ce microcontinent. Les structures courbées de sa façade ouest soulignent la proximité de la zone de suture consécutive à la collision entre les deux blocs continentaux (figure 2.22, point 1). À la fin de l'orogénèse grenvillienne, vers 800 millions d'années, tous les continents terrestres de l'époque étaient réunis en un seul bloc appelé Rodinia. La stabilité de cette masse continentale est éphémère et vers 600 millions d'années, sous la force de tensions internes, elle commence à se disloquer. Au nord, c'est l'ouverture du graben du Saguenay, au sud-est, l'ouverture du graben du Saint-Laurent, qui se poursuivra jusqu'à la formation d'un océan, l'océan Iapétus. L'ouverture du graben du Saguenay est accompagnée d'une série de failles parallèles qui marquent les limites du fossé d'effondrement lié au graben avec la partie centrale du massif plus élevée (figure 2.22, point 2).

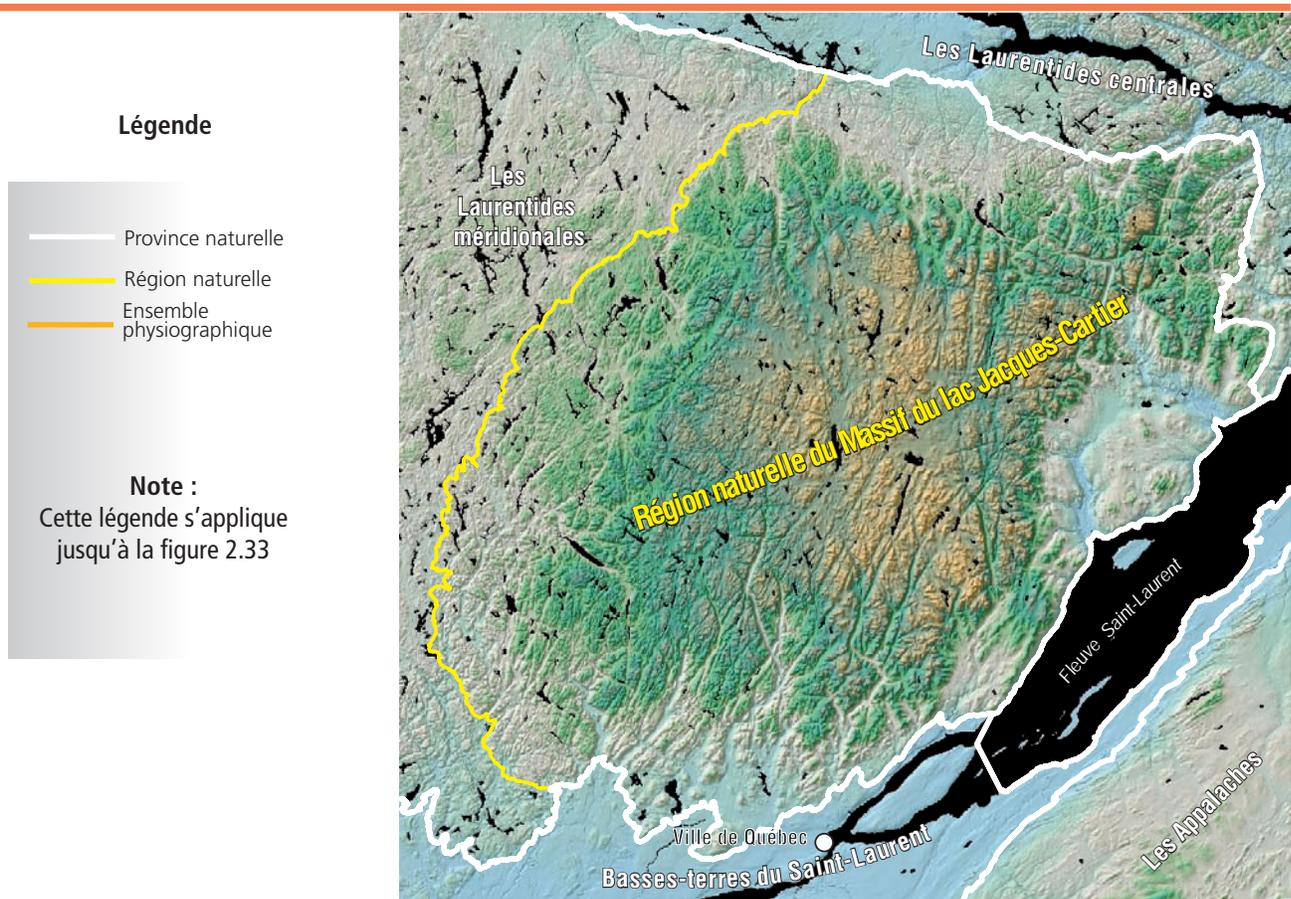


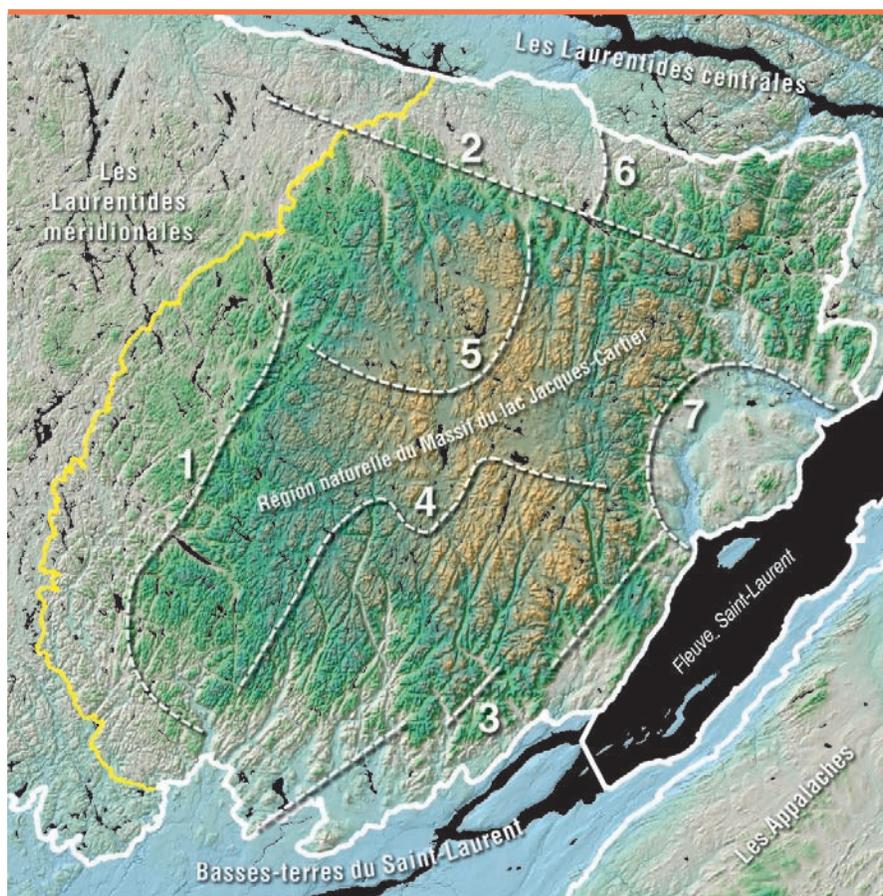
Figure 2.21 La région naturelle du massif du lac Jacques-Cartier

On retrouve l'équivalent au sud en parallèle au graben du Saint-Laurent; par contre la faille est ici en escalier et découpe la limite de la zone d'effondrement en plusieurs blocs décalés (figure 2.22, point 3), mais le contraste est aussi fort avec la partie centrale du massif, au nord, nettement plus élevée. L'empreinte la plus spectaculaire reste cependant l'astroblème de Charlevoix, consécutif à la chute d'une météorite il y a près de 365 millions d'années (figure 2.22, point 7).

Les limites que nous venons de souligner séparent la périphérie de la région naturelle, plus basse, d'un dôme central surélevé. Depuis sa mise en place lors de l'orogénèse grenvillienne, ce dôme a été longuement

soumis à l'érosion qui l'a fortement « pénéplané ». Mais, à la suite de mouvements épirogéniques liés à l'érection de la chaîne appalachienne et à l'ouverture ultérieure de l'océan Atlantique, le dôme a été légèrement soulevé. Ce soulèvement a eu pour effet d'en rajeunir le relief et les cours d'eau, à la recherche d'un nouveau profil d'équilibre longitudinal, se sont encaissés dans leurs vallées sur les versants sud et nord du dôme (figure 2.22, points 4 et 5).

La connaissance des événements géologiques majeurs qui ont jalonné l'histoire de la région naturelle débouche sur une spatialisation préliminaire dont les lignes de force sont cohérentes avec la logique hiérarchique du CER.



- 1) Transition entre la zone de suture du microcontinent Québécois et le macrocontinent Laurentia à l'ouest et le dôme central à l'est
- 2) Faille parallèle synchrone à la formation du graben du Saguenay
- 3) Failles parallèles synchrones à la formation du graben du Saint-Laurent (failles en escalier)
- 4) Versant sud du dôme central entaillé par des vallées encaissées
- 5) Versant nord du dôme central entaillé par des vallées encaissées
- 6) Structure fracturée orthogonale
- 7) Astroblème de Charlevoix

Figure 2.22 La région naturelle du massif du lac Jacques-Cartier fait partie de la province naturelle des Laurentides méridionales

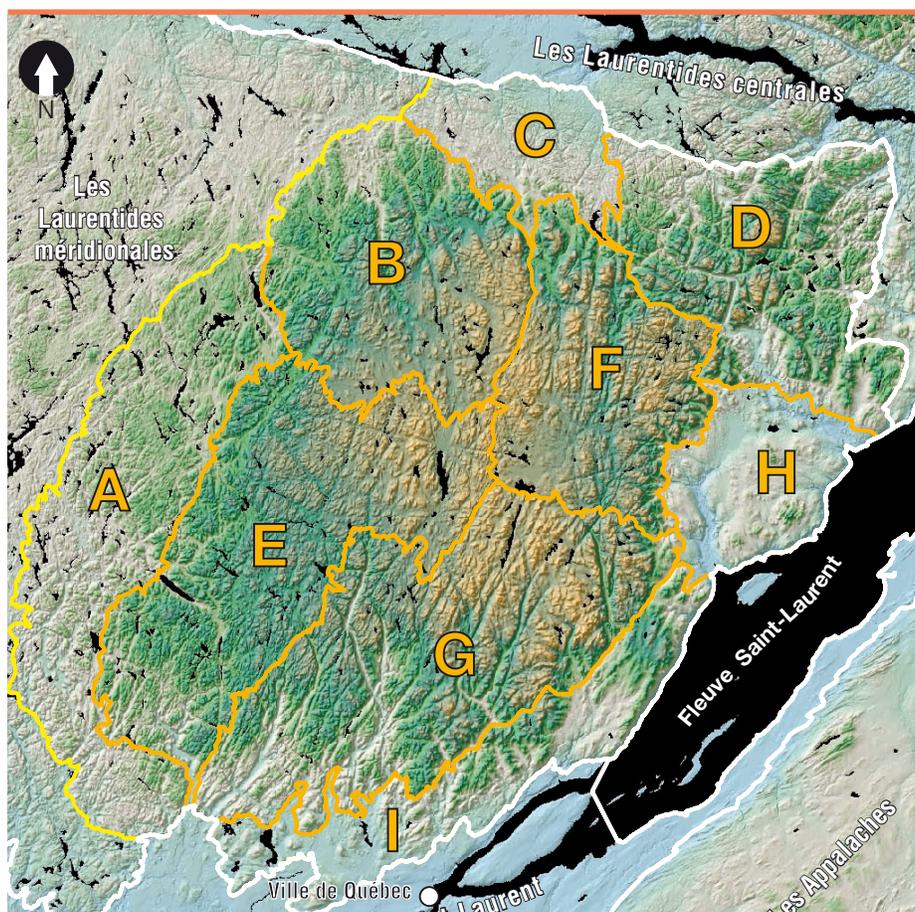


Figure 2.23. Les limites des ensembles physiographiques (niveau 3 du CER) de la région naturelle du massif du lac Jacques-Cartier

Elle propose des structures spatiales distinctes qu’une analyse visuelle attentive va compléter. Ainsi, au nord-est de la région, se dégage une zone remarquable par sa structure fracturée orthogonale très marquée (figure 2.22, point 6). Fort de cette analyse accompagnée d’informations complémentaires (géologie, dépôts de surface, images satellitaires, etc.), la cartographie du niveau 3 peut être complétée (figure 2.23).

EXEMPLE 2 : Cartographie des ensembles physiographiques (niveau 3) de la région naturelle du plateau d’Estrie-Beauce

Nous sommes en pays appalachien et les structures majeures du relief sont très marquées. Elles suivent une orientation générale sud-ouest–nord-est pour l’ensemble de la chaîne. Malgré cette organisation spatiale très forte, le cartographe devra aussi maîtriser les épisodes essentiels de la constitution des Appalaches pour bien décrypter la hiérarchie des lignes de force qui y règne. Quels sont ces épisodes essentiels? On sait aujourd’hui que la chaîne appalachienne s’est érigée en trois orogénèses successives dont seules les deux premières ont réellement affecté le plateau d’Estrie-Beauce.

Il y a près de 450 millions d’années, une première orogénèse consécutive à la collision entre le microcontinent des Chain Lakes et le macrocontinent Laurentia a donné naissance à la chaîne taconique, première phase de la constitution des Appalaches. Son cœur est aujourd’hui constitué des monts Notre-Dame, qui traversent le Québec des Bois-Francs jusqu’en Gaspésie. Cette collision a aussi causé la fermeture partielle de l’océan lapétus, dont une partie du fond s’est trouvée coincée et projetée vers la surface. Ainsi, à l’arrière des monts Notre-Dame, on retrouve une succession de buttes et collines basaltiques qui sont des vestiges de ce fond océanique disparu. Pendant plus de 50 millions d’années, la chaîne nouvellement formée a été soumise à l’érosion.

Puis, entre 400 et 360 millions d’années, un nouveau microcontinent, Avalonia, se rapproche et entre en collision avec ce qui reste de la chaîne taconique : c’est l’orogénèse acadienne et la deuxième phase d’édification des Appalaches. Cette nouvelle collision entraîne des chevauchements des nouvelles terres avec celles déjà existantes, dont la limite nord est matérialisée par la faille de la Guadeloupe; elle provoque aussi des intrusions granitiques que l’érosion amènera plus tardivement à la surface.

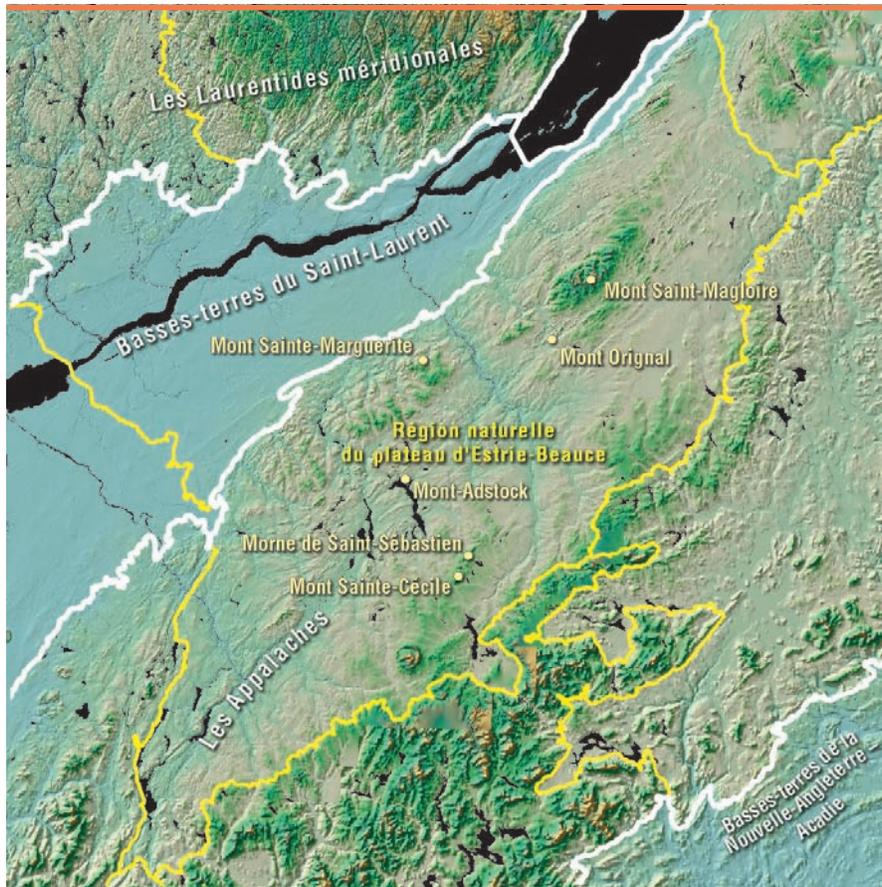


Figure 2.24. Localisation de la région naturelle du plateau d'Estrie-Beauce

Fort de cette connaissance, abordons maintenant l'analyse de la région naturelle du plateau d'Estrie-Beauce.

- 1) En partant du nord, des basses-terres du Saint-Laurent et en se dirigeant vers le sud, on rencontre d'abord un premier complexe de collines (les collines de Bécancour) qui culminent à près de 700 m au mont Sainte-Marguerite (mont Radar), à l'ouest de la rivière Chaudière, et dépassent 900 m au mont Saint-Magloire (massif du Sud), à l'est de la rivière Chaudière. Ce sont les monts Notre-Dame, le cœur de la chaîne taconique (figure 2.25).
- 2) En continuant vers le sud, derrière ces hautes collines, on rencontre une zone plus basse entrecoupée de buttes et collines basaltiques (figure 2.25). Voici les vestiges du fond océanique ramenés à la surface aux monts Adstock, Gros Morne et Orignal. La limite entre ces deux ensembles est matérialisée par une limite géologique très forte : la ligne Brompton-Baie-Verte, qui court des Cantons de l'Est jusqu'en Gaspésie et souligne l'ancien contact entre le macrocontinent Laurentia et le fond océanique de l'époque.

- 3) En continuant toujours vers le sud, on retrouve un haut plateau localement interrompu par des reliefs plus marqués. Le plateau correspond à la deuxième phase de la mise en place des Appalaches, la chaîne acadienne; les différents reliefs comme, entre autres, le morne de Saint-Sébastien, le mont Sainte-Cécile, le pourtour sud du lac Mégantic et l'extrémité sud-ouest du lac Saint-François, témoignent des intrusions granitiques remontées des profondeurs lors de cette orogénèse (figure 2.25). Le contact entre le plateau (la chaîne acadienne) et la zone dépressionnaire précédente est souligné par la faille de La Guadeloupe.

Ainsi apparaissent clairement les lignes de force de premier niveau à l'intérieur de la région naturelle. C'est sur elles que le cartographe doit s'appuyer pour établir les bases de la hiérarchie des niveaux de perception. Elles sont étroitement liées à la mise en place des Appalaches; à nouveau apparaissent les relations très fortes entre l'histoire géologique de la région naturelle et son organisation spatiale actuelle. Leur connaissance est essentielle à la cartographie du niveau 3 du CER (figure 2.26), mais encore faut-il analyser les images du territoire à la bonne échelle pour éviter de s'égarer sur de mauvaises voies.

La perte de vision globale sur l'ensemble de la région naturelle peut mener le cartographe à déroger à la logique hiérarchique dictée par l'histoire géologique. Dans l'exemple de la figure 2.27, il sera fort tentant de proposer, en premier lieu, une unité avec les hautes collines du massif du Sud, car, du point de vue physiographique, la limite nord est aussi forte que la limite sud. Elles ne sont cependant pas de même ordre : l'une délimite l'orogénèse taconique (limite sud), l'autre n'en est qu'une subdivision et si on l'élève immédiatement au premier niveau dans le découpage de la région naturelle, les subdivisions de même niveau vont se multiplier. Seront alors cartographiées des unités naturelles existant réellement sur le terrain, mais d'un niveau de perception inférieur, avec le risque important, si on ne peut respecter le fil conducteur de l'histoire géologique, d'aboutir à un découpage d'unités territoriales de niveaux de perception différents.

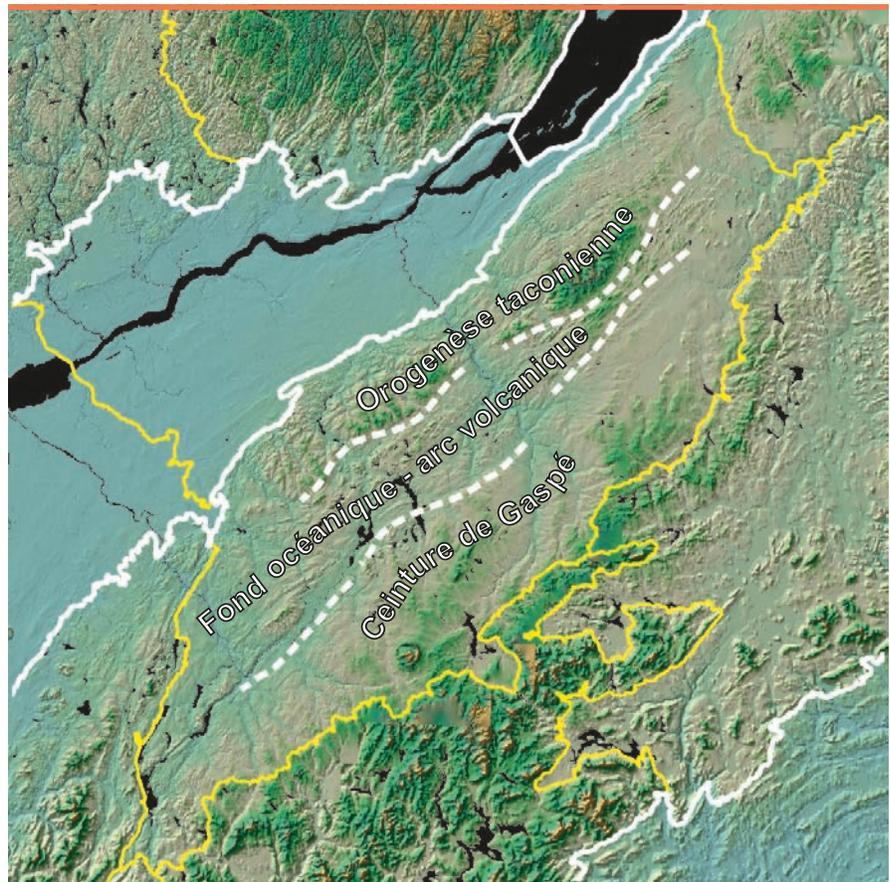
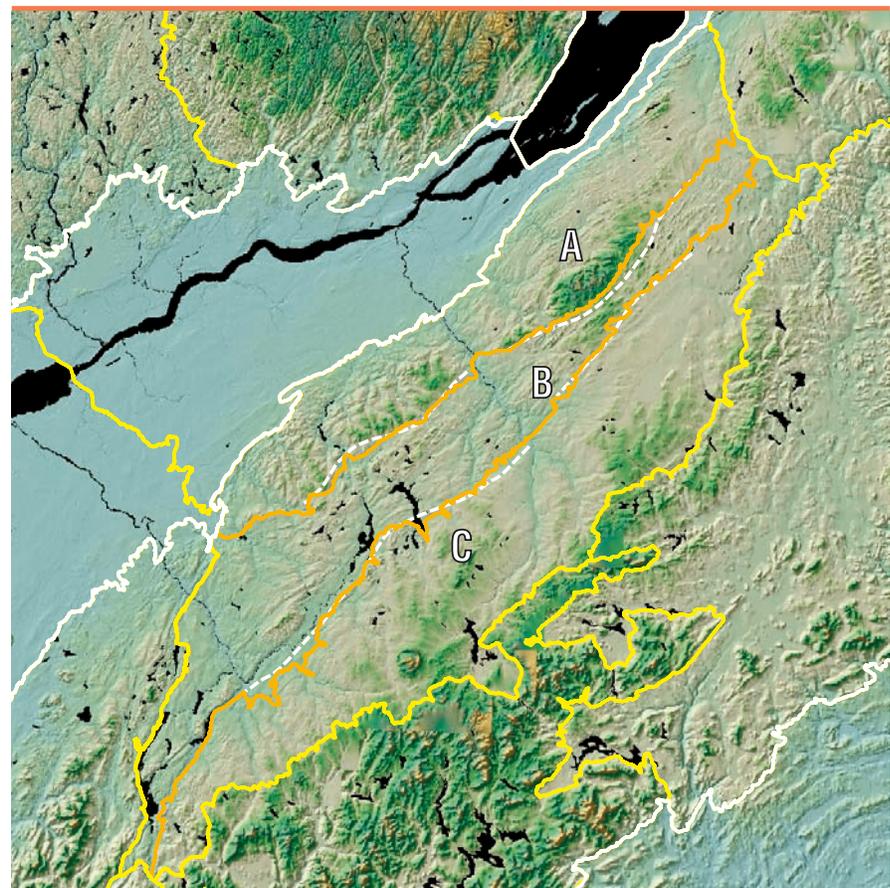


Figure 2.25. Lignes de force majeures de la région naturelle du plateau d'Estrie-Beauce

Figure 2.26. Ensembles physiographiques de la région naturelle du plateau d'Estrie-Beauce



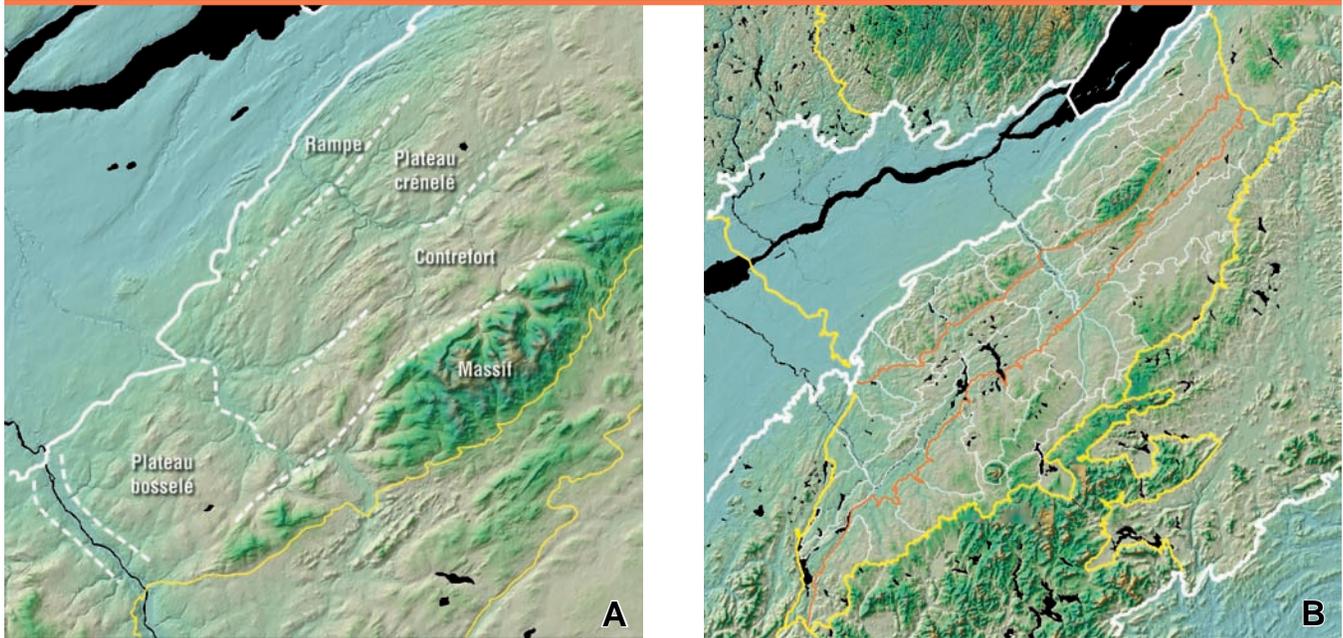


Figure 2.27. Conséquence d'un manque de vision globale (A) et d'une analyse à trop grande échelle : ce sont des limites de polygones de niveaux inférieurs (B)

EXEMPLE 3 : Cartographie des ensembles physiographiques (niveau 3) de la région naturelle de la plaine de Turgeon

La région naturelle de la plaine de Turgeon, située dans les basses terres de l'Abitibi, s'étend de part et d'autre de la limite interprovinciale entre le Québec et l'Ontario (figure 2.28). Elle a connu une histoire quaternaire relativement compliquée marquée par une succession d'événements liés à la fin de l'épisode glaciaire. La

connaissance de ces événements fournit la clé pour comprendre les composantes de cette région et leur organisation spatiale qui, malgré le relief peu marqué, sont fort contrastées.

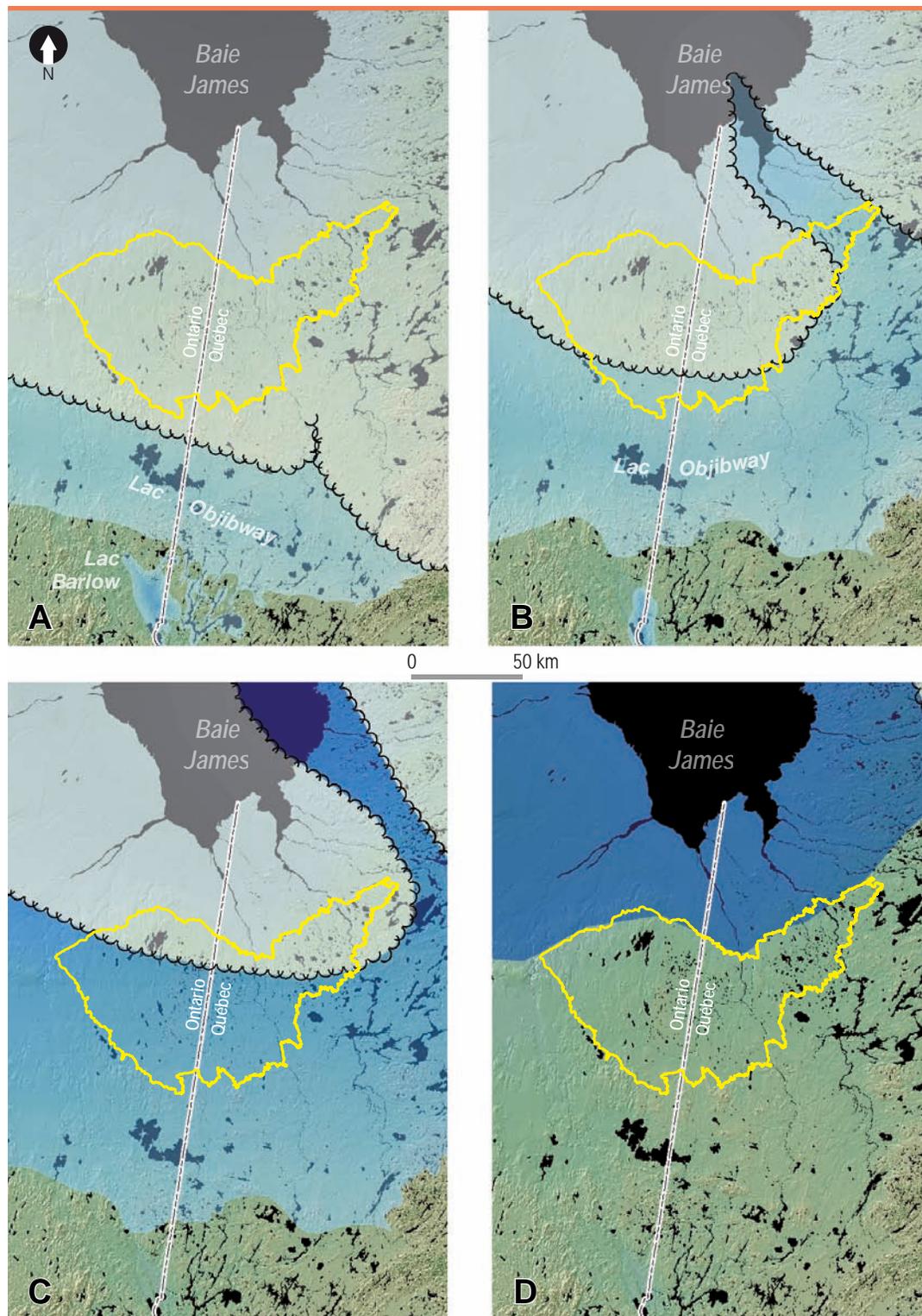
Contexte régional de la déglaciation. Lors de son retrait, la calotte glaciaire wisconsinienne s'est ouverte à la manière d'une fermeture éclair, permettant l'édification d'une moraine interlobaire (monticule de sable et gravier qui court sur de nombreux kilomètres) au fur et à mesure du retrait vers le nord des deux lobes glaciaires. La fonte de la glace a donné lieu à la création, à la marge sud de la calotte en retrait, d'un grand lac pro-glaciaire (le lac Ojibway) dans lequel se sont déposés des limons et des argiles. À deux reprises au moins, des réavancées vers le sud du front glaciaire (réavancées de Cochrane) dans les eaux peu profondes du lac Ojibway ont interrompu le retrait vers le nord de la calotte glaciaire. Ces réavancées ont laissé des indices remarquables sur le territoire (figure 2.29).



Figure 2.28. Localisation de la région naturelle de la plaine de Turgeon

Le relief étant si peu marqué, la vision en 3D tirée du modèle numérique d'altitude (MNA) fournit peu d'informations visuelles. L'analyse spatiale va surtout s'appuyer sur des images satellitaires Landsat, sur la configuration du réseau hydrographique et sur la carte des dépôts de surface (figure 2.30). Ainsi se distinguent plusieurs ensembles territoriaux.

Figure 2.29.
Contexte de la
déglaciation de la région
naturelle
de la plaine de
Turgeon (adapté de
Dyke, 2004)



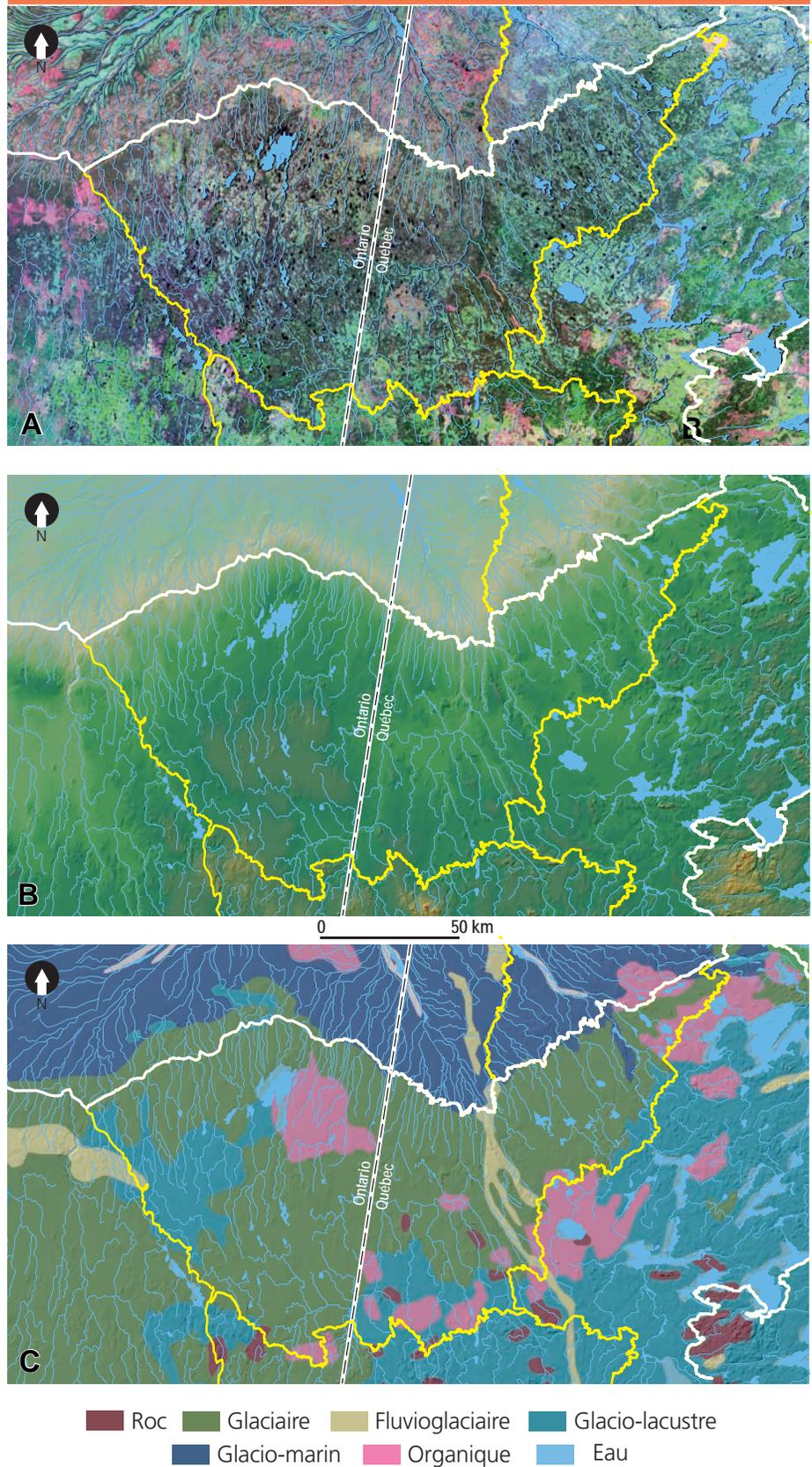
- A** – Ouverture de la calotte glaciaire le long de la moraine interlobaire d’Harricana. Formation des lacs proglaciaires Barlow et Ojibway (8,5 ka ¹⁴C BP)
- B** – Première réavancée glaciaire de Cochrane dans le lac Ojibway (8,2 ka ¹⁴C BP)
- C** – Deuxième réavancée de Cochrane et vidange du lac Ojibway dans la mer de Tyrell au niveau de la baie James (7,9 ka ¹⁴C BP)
- D** – Maximum d’invasion de la mer de Tyrell (7,7 ka ¹⁴C BP)

1) À peu près au centre de la partie québécoise de la région naturelle se retrouve la seule unité avec un certain relief. Elle contraste fortement avec les territoires l'entourant, par sa morphologie (monticule allongé), par la configuration et la faible densité de son réseau hydrographique, par la nature de ses dépôts de surface (sable et gravier) et par la composition du couvert végétal (abondance de feuillus et absence de tourbières). Ce long monticule surélevé correspond à la moraine interlobaire d'Harricana.

2) La moraine interlobaire isole la partie orientale de la région naturelle qui se caractérise par un réseau hydrographique subparallèle et des lacs de taille moyenne bien répartis sur l'ensemble du secteur. La morphologie des dépôts de surface (formes fuselées) liée à la réavancée glaciaire de Cochrane (figure 2.31) impose la configuration du réseau hydrographique.

À l'ouest de la moraine interlobaire, la situation est un peu plus complexe.

3) À l'extrémité nord de la région naturelle, une bande étroite se démarque nettement par le réseau hydrographique parallèle très dense et par l'absence notoire de plans d'eau. L'image Landsat (figure 2.30) révèlent bien ce parallélisme souligné par des interfluvies étroits et allongés, orientés nord-sud. Ils ont été ainsi façonnés lors de la réavancée de Cochrane II au cours de laquelle le glacier, avançant dans les eaux du lac Ojibway, a donné une forme drumlinoïde aux dépôts glacio-lacustres. Cette bande



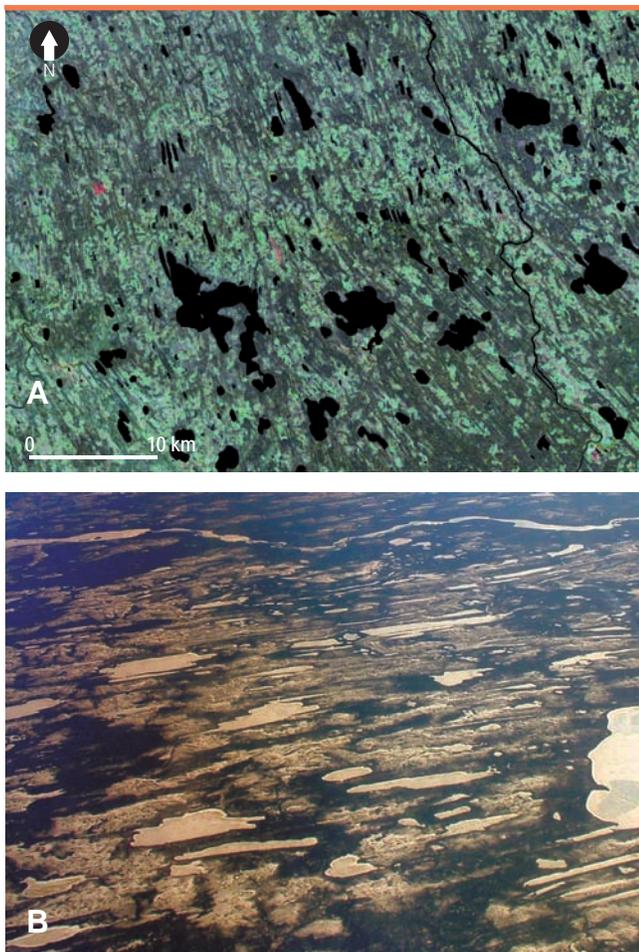


Figure 2.31. Formes fuselées et quasi parallèles du till de Cochrane accompagnées de lacs de taille moyenne également répartis

A - Image Landsat B - Photo oblique

de terre correspond à un long versant régulier de pente très faible (l'altitude passe de 90 m au nord à 150 m au sud) regardant vers le nord. Le glacier l'a profondément façonné de « rayures » parallèles très denses, car il s'est comporté comme un obstacle à franchir sur le chemin de la réavancée glaciaire. La limite méridionale de ces formes marque d'ailleurs la limite méridionale de la réavancée de Cochrane II. Au-delà, l'orientation générale des dépôts change brusquement vers le sud-est (figure 2.32).

- 4) Dès le changement d'orientation générale, les formes drumlinoïdes deviennent moins nettes. Elles témoignent de la réavancée de Cochrane I, antérieure à la précédente (figure 2.32). Est-ce la raison pour laquelle l'empreinte est moins forte ou est-ce parce que ce secteur correspond à une grande cuvette au fond de laquelle l'eau étant plus profonde, le glacier aurait eu moins d'impact sur les dépôts déjà en place? Un réseau hydrographique irrégulier parcourt

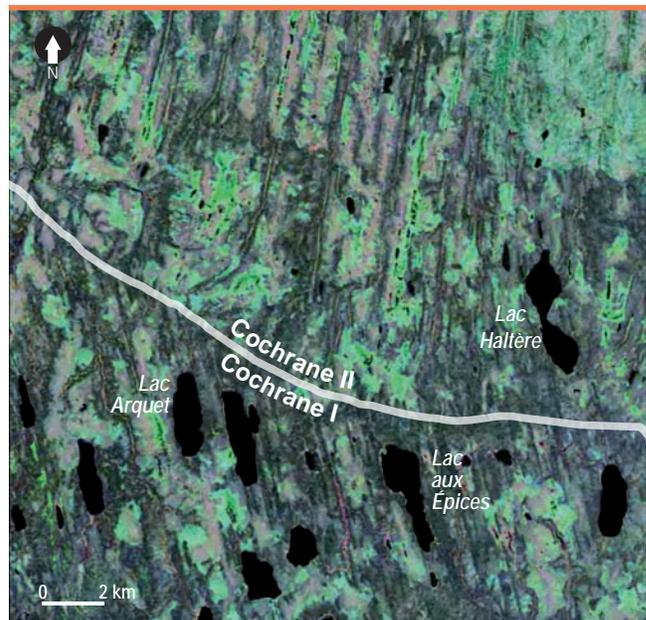


Figure 2.32. Limite méridionale de la réavancée de Cochrane II sur l'image Landsat

cette partie de la région naturelle que parsèment de nombreux lacs de taille moyenne aux contours très réguliers et quasi circulaires accompagnés de nombreuses tourbières de grande superficie.

- 5) En continuant vers le sud, la cuvette cède sa place à des terres plus hautes (l'altitude dépasse 300 m) dans lesquelles les formes drumlinoïdes redeviennent plus prégnantes, les lacs gardent la même importance et les grandes tourbières disparaissent quasiment.
- 6) Enfin, l'extrémité sud voit réapparaître les tourbières et disparaître les lacs.

La connaissance des dernières phases de la déglaciation s'avère cruciale pour interpréter correctement les structures spatiales de la région naturelle et bien hiérarchiser les lignes de force de leur organisation révélées par l'analyse du MNA, des images satellitaires, du réseau hydrographique et de la carte des dépôts de surface. Dans les régions à faible relief où les dépôts de surface atténuent l'empreinte géologique du socle rocheux, l'histoire quaternaire prend le relais et fournit le fil conducteur à la compréhension des structures spatiales (figure 2.33).

2.4 Données et outils

Comme bien des sphères de la vie courante, le domaine de la cartographie en général et celui de la cartographie écologique en particulier ont connu une véritable révolution technologique au cours des trente dernières années. On est très rapidement passé du « tout papier » au « tout numérique », tant au bureau que sur le terrain. Ainsi, lors des campagnes d'échantillonnage de terrain, la prise de notes dans des carnets et sur des fiches

papier a cédé le pas à la prise de notes directement sur un ordinateur; lors de la production cartographique, les cartes de référence en papier ont aussi cédé le pas à des cartes numériques. Autrefois simples outils de support à la production des cartes écologiques, les cartes topographiques sont aujourd’hui devenues des sources de données de base à référence spatiale. Il est donc tout à fait normal que la réalisation du CER tire le plus de profits possible de ces développements technologiques, tant pour acquérir des données que pour les gérer et les traiter. Nous en présentons les grandes lignes ci-dessous selon deux grandes rubriques, données et outils, même si leur distinction n’est pas toujours chose facile.

2.4.1 Données de base

Cinq bases de données sont régulièrement utilisées :

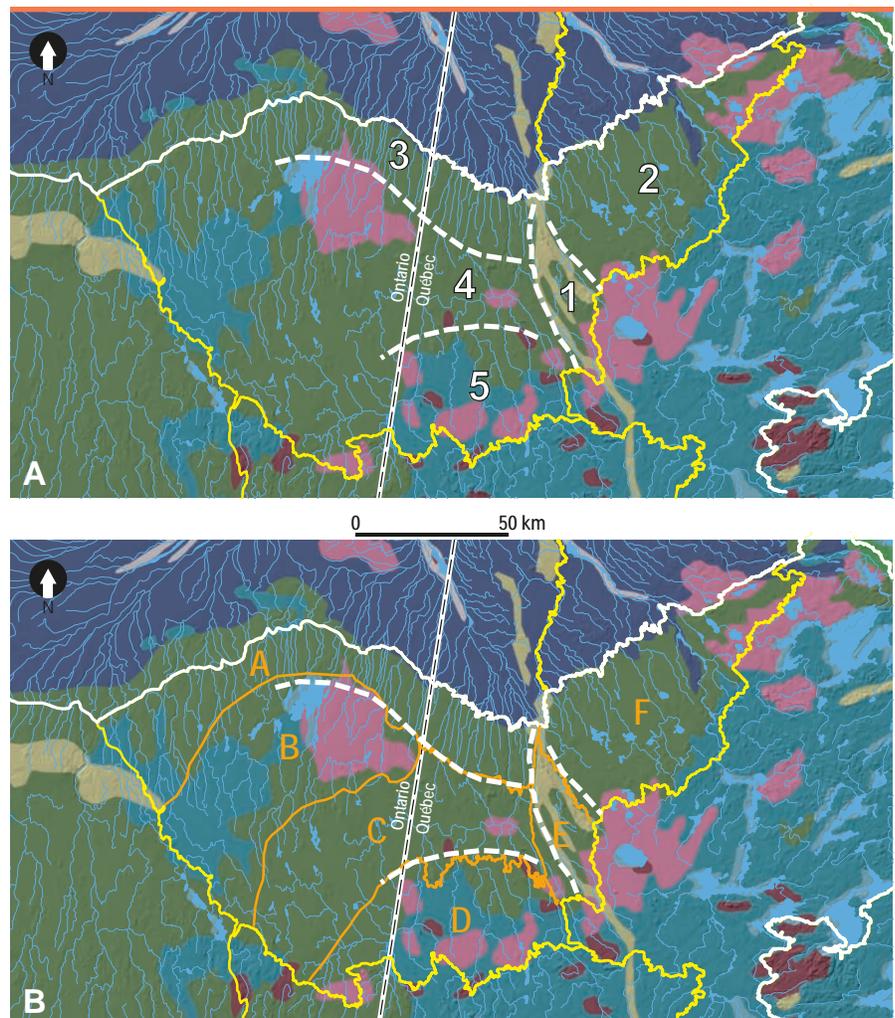
- la base de données topographiques du Québec (BDTQ);
- la base de données pour l’aménagement du territoire du Québec (BDAT);
- la base de données topographiques et administratives du Québec (BDTA);

- la base de données géographiques et administratives du Québec (BDGA);
- la base nationale de données topographiques du Canada (BNDT) (tableau 2.1).

La base de données topographiques du Québec (BDTQ 20K) à l’échelle du 1 : 20 000 comprend 25 couvertures différentes, comme les courbes de niveau, l’hydrographie, les voies de communication, des infrastructures, la végétation, des toponymes, etc.

La base de données pour l’aménagement du territoire (BDAT 100K) à l’échelle du 1 : 100 000 couvre les mêmes classes que la BDTQ 20K, mais ses sources diffèrent selon la latitude. Au sud du 51^e parallèle, elle correspond à une généralisation de la BDTQ 20K; entre le 51^e et le 53^e parallèle nord, elle fait appel à un procédé de photogrammétrie des images panchromatiques du satellite SPOT; au nord du 53^e parallèle, elle correspond à une généralisation de la base nationale de données topographiques (BNDT 50K; cf. page suivante).

Figure 2.33.
Lignes de force (A) et cartographie des ensembles physiographiques (B) de la région naturelle de la plaine de Turgeon (fond : dépôts de surface et réseau hydrographique)



- 1) Moraine interlobaire d’Harricana
- 2) Cochrane II, partie orientale
- 3) Cochrane II, partie occidentale, réseau hydrographique parallèle et dense
- 4) Cochrane I
- 5) Dépôts glacio-lacustres et organiques

Tableau 2.1. Les bases de données cartographiques

Nom	Acronyme	Échelle	Territoire couvert	Organisme responsable
Base de données topographiques du Québec	BDTQ 20K	1 : 20 000	Québec : sud du 52 ^e parallèle	MERN ¹
Base de données pour l'aménagement du territoire	BDAT 100K	1 : 100 000	Ensemble du Québec	MERN
Base de données topographiques et administratives du Québec	BDTA 250K	1 : 250 000	Ensemble du Québec	MERN
Base de données géographiques et administratives du Québec	BDGA 1M	1 : 1 000 000	Ensemble du Québec	MERN
Base nationale de données topographiques	BNDT	1 : 50 000 et 1 : 250 000	Ensemble du Canada	RNC ²

¹ MERN : ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec

² RNC : Ressources naturelles Canada

La base de données topographiques et administratives du Québec à l'échelle de 1 : 250 000 (BDTA 250K) fournit aux usagers une assise géographique et administrative à moyenne échelle sur l'ensemble du territoire québécois. En plus de son contenu sur le relief, l'hydrographie, les infrastructures majeures, elle présente des informations administratives comme les limites des régions administratives, des MRC, des municipalités, etc.

La base de données géographiques et administratives du Québec à l'échelle de 1 : 1 000 000 (BDGA 1M) provient d'une généralisation du contenu de la BDTA 250K.

La base nationale de données topographiques (BNDT), développée par Géomatique Canada, couvre l'ensemble du territoire canadien. Elle comprend les éléments habituellement représentés sur une carte topographique aux échelles de 1 : 50 000 et de 1 : 250 000 (hydrographie, courbes de niveau, végétation, infrastructures diverses, toponymie, etc.).

De nombreux utilisateurs les qualifient encore communément de cartes, car elles sont, à un moment ou à un autre, éditées sous forme de carte. Mais la tendance générale est aujourd'hui de les considérer plutôt comme une mine de données à référence spatiale que l'on peut extraire et exploiter indépendamment grâce aux progrès de la géomatique. Pour la réalisation du CER, on utilise surtout leurs composantes topographiques et hydrographiques.

2.4.2 Photographies aériennes

Depuis leur avènement, les photographies aériennes ont toujours constitué une source d'informations incontournable en cartographie écologique. Malgré tous les progrès technologiques des vingt dernières années, elles restent encore d'actualité dans la plupart des projets,

surtout dans les projets à moyenne et à grande échelle. Dans les projets à petite échelle, elles servent plutôt de source d'échantillonnage et de validation des images satellitaires. Au Québec, on a le plus souvent recours à deux échelles, le 1 : 40 000 et le 1 : 15 000; les photos de la première sont en noir et blanc, tandis que celles de la deuxième peuvent aussi être en infrarouge couleur. Les progrès technologiques font que, aujourd'hui, les photographies aériennes conventionnelles ont tendance à être remplacées par des photographies numériques. La résolution au sol du cliché prend alors le pas sur la stricte notion d'échelle. L'utilisation d'orthophotographies avec une résolution au sol de 1 m à 10 cm se généralise également.

Une orthophotographie (communément dénommée orthophoto) est une image d'un cliché aérien (numérique ou conventionnel) dont la géométrie a été redressée de sorte que chaque point soit superposable à une carte plane qui lui correspond. De cette façon, une orthophoto semble être prise à la verticale de tous les points qu'elle figure, ces points étant situés sur un terrain parfaitement plat.

Toutefois, avec les orthophotos, la possibilité de la vision stéréoscopique n'existe plus. Or, l'analyse stéréoscopique des photographies aériennes, lors des inventaires de terrain, est pleine d'enseignements; elle nourrit la mémoire du photo-interprète d'une multitude de relations photo-terrain dont il tire le plus grand profit pour la cartographie finale du territoire. S'en passer est une grave erreur que l'on observe malheureusement de plus en plus aujourd'hui dans la planification et la réalisation des travaux de terrain. Affirmer ceci ne signifie pas le rejet des progrès technologiques, car ils ont rendu le travail des spécialistes en cartographie écologique très efficace. La remarque est plutôt que le fait de ne se fier qu'à la technologie amène à faire peu de cas de

la connaissance empirique et à laisser tomber des outils (les divers types de stéréoscopes, par exemple) qu'on associe prématurément à un passé révolu! Longtemps, par contre, la portée des photographies aériennes a été limitée aux cartographies à moyenne et grande échelle. Les travaux à petite échelle concernant particulièrement les niveaux supérieurs du CER qui nécessitent une vue synoptique sur de très grandes portions de territoire ont dû attendre l'arrivée des images satellitaires.

2.4.3 Images satellitaires

Elles ont atteint leur plein potentiel avec l'apport de la géomatique, qui a ouvert les portes aux traitements numériques d'une incroyable quantité d'informations et à la vision en 3D du territoire. Aujourd'hui, avec l'avènement des satellites à haute résolution comme Ikonos (1 m en noir et blanc et 4 m en couleur avec un champ d'observation de 11 km sur 11 km), Quickbird (61 cm en noir et blanc et 2,44 m en couleur avec un champ d'observation de 16,5 km sur 16,5 km), RapidEye (5 m de résolution, 77 km de largeur), sans oublier Spot, qui offre une gamme complète d'images allant de 20 m jusqu'à 2 m de résolution avec un large champ d'observation de 60 km sur 60 km, ou Landsat 7, qui offre une résolution allant de 15 m dans le panchromatique à 30 m dans le multi spectral pour un champ d'observation de 185 km sur 172 km, ou encore Radarsat 2, avec une résolution spatiale de 3 m pour un champ d'observation allant de 10 km à 30 km, les images satellitaires prennent de plus en plus de place.

2.4.4 Données LiDAR

La télédétection par laser, ou LiDAR, acronyme du terme anglais « *light detection and ranging* » ou du terme « *laser imaging detection and ranging* », est une technique de mesure de haute précision de la surface de la terre en trois dimensions fondée sur l'analyse des propriétés d'un faisceau de lumière laser renvoyé vers son émetteur. Aujourd'hui, les données LiDAR sont très utiles à la cartographie écologique, car elles fournissent une image très détaillée du territoire, ce qui facilite l'interprétation des structures spatiales, de la géologie, des dépôts de surface, du drainage, des milieux humides, etc.

Pour en faciliter l'utilisation, le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) rend disponibles quatre produits dérivés du LiDAR dans un format convivial, diffusés par feuillet cartographique à l'échelle du 1 : 20 000 :

- Un modèle numérique de terrain de résolution spatiale de 1 m;
- Un modèle numérique de terrain avec relief ombré de résolution spatiale de 2 m;
- Un modèle de la hauteur de la couverture végétale de résolution spatiale de 1 m;

- Une cartographie des pentes du terrain en huit classes et de résolution spatiale de 2 m.

D'ici à 2022, ces données seront disponibles pour la majeure partie du Québec méridional (sud du 52^e parallèle).

2.4.5 Données thématiques

Pour planifier les projets de cartographie écologique (devis techniques, inventaires de terrain, etc.), décrire les polygones cartographiques, puis les interpréter (potentiel, sensibilité, capacité de support, etc.), le CER fait appel à des informations sur la géologie, les dépôts de surface, les sols, le climat, le couvert forestier, l'utilisation du sol, etc. Pour donner une idée de ces données, voyons l'essentiel de celles qui ont été utilisées jusqu'à ce jour et dont la plus grande partie l'a été pour mener à bien les interprétations et les analyses du projet de la stratégie québécoise sur les aires protégées.

Géologie

L'information géologique provient de la carte géologique du Québec au 1 : 1 500 000 (Avramtchev, 1985), puis au 1 : 2 000 000 (Thériault, 2002; Thériault et Beauséjour, 2012). Chaque polygone de cette carte donne l'information sur la province géologique à laquelle il appartient, sur l'âge et sur la lithologie du socle rocheux. Les cartes géologiques plus détaillées, cartographiées à l'échelle de 1 : 250 000 ou 1 : 50 000 sont aussi utilisées pour le CER des niveaux inférieurs.

Dépôts de surface et sols

Quatre sources d'informations distinctes et complémentaires ont été utilisées.

- 1) La carte des pédo-paysages à l'échelle de 1 : 1 000 000 (Lamontagne, 1992, 1993; Lamontagne et Drolet, 1993), qui est une synthèse pancanadienne des cartes pédologiques habituellement dressées au 1 : 50 000 et de divers travaux d'inventaires et cartographies pour les territoires non couverts par les cartes pédologiques. L'information porte sur l'origine, la nature, l'épaisseur, la texture et la pierrosité du dépôt de surface, le drainage du sol, la forme de terrain et sa pente.
- 2) Les cartes pédologiques au 1 : 50 000 du Québec agricole distribuées par l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) offrent de l'information concernant la série de sol : propriétés pédogénétiques, origine, texture, pierrosité, épaisseur de la roche mère pédologique (dépôt de surface) et drainage naturel du sol.

- 3) Les données du Système d'information écoforestière (SIEF, voir l'information forestière ci-dessous) du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec couvrent le territoire québécois approximativement au sud du 52^e parallèle. On obtient de l'information sur l'origine, la nature, la texture, la pierrosité et l'épaisseur des dépôts de surface ainsi que sur le drainage naturel des sols. L'information est cartographiée à l'échelle du 1 : 50 000.
- 4) Les données de l'inventaire du Capital-Nature du territoire de la Baie-James (Ducruc et Bérubé, 1979; Jurdant et Ducruc, 1979) et de l'inventaire du Capital-Nature de la Moyenne-et-Basse-Côte-Nord (Ducruc, 1985). Tout comme précédemment, on a de l'information sur l'origine, la nature, la texture, la pierrosité et l'épaisseur des dépôts de surface ainsi que sur le drainage naturel des sols. Quoique la cartographie de ces territoires soit publiée au 1 : 125 000, l'information est issue de photographies aériennes à l'échelle du 1 : 40 000 ou du 1 : 60 000.

Climat

Deux séries d'informations climatiques distinctes :

- 1) Un répertoire des stations météorologiques du Québec et de leur répartition spatiale avec les données climatiques habituelles de toute station météo.
- 2) Une carte des climats du Québec (Gerardin et McKenney, 2001). Cette carte présente le Québec en 15 classes climatiques distinctes. Elle a été dressée à partir de l'analyse d'une maille territoriale de 2 km sur 2 km appliquée à un modèle numérique d'altitude dérivé des cartes topographiques au 1 : 250 000 et qualifiée par les neuf paramètres climatiques suivants :
 - Température annuelle moyenne (°C);
 - Amplitude journalière moyenne des températures (°C);
 - Température moyenne des trois mois les plus chauds (°C);
 - Température moyenne des trois mois les plus froids (°C);
 - Précipitation annuelle totale (mm);
 - Précipitation des trois mois les plus chauds (mm);
 - Précipitation des trois mois les plus froids (mm);

- Durée annuelle moyenne de la saison de croissance (jours);
- Nombre annuel de degrés-jours de croissance (°C).

Information forestière

L'information forestière est fournie par le SIEF. La base de cette information concerne le couvert forestier, dont la cartographie est dressée au 1 : 20 000 (type de couvert, groupement d'essences, âge, hauteur, perturbations, etc.), mais aussi, comme nous l'avons signalé un peu plus haut, les dépôts de surface, dont la cartographie est de l'ordre du 1 : 50 000. Ces données sont aujourd'hui publiques.

Information biologique

En premier lieu, on retrouve la cartographie des espèces menacées et vulnérables (plantes vasculaires, faune vertébrée et invertébrée) qui provient du Centre de données sur le patrimoine naturel du Québec (CDPNQ); l'information couvre l'ensemble du territoire québécois.

En second lieu, la cartographie de l'indice de qualité de l'habitat (IQH) des espèces suivantes : le cerf de Virginie, la gélinotte huppée, le grand pic, le lièvre d'Amérique, la martre d'Amérique, l'orignal, l'ours noir, la paruline couronnée, la sittelle à poitrine rousse pour le milieu terrestre et l'omble de fontaine pour le milieu aquatique. L'IQH est un modèle mathématique qui prend en considération les besoins des espèces. Pour les espèces terrestres, ces besoins s'expriment généralement par la composition et la structure de la végétation, tandis que pour les espèces aquatiques, les besoins sont définis par la qualité de l'eau, la nature du substrat, la vitesse du courant et la pente du cours d'eau. La cartographie de ces IQH couvre le Québec forestier au sud du 52^e parallèle.

Utilisation et occupation du territoire

De nombreuses informations traitant de l'utilisation et de l'occupation du territoire ont été incorporées au serveur.

- 1) Tout d'abord, une cartographie de l'utilisation du sol, dressée à partir d'une classification d'images du satellite Landsat 7 réalisée en collaboration par plusieurs ministères et organismes (Service canadien de la faune et coll., 1999-2003); elle couvre une grande partie du Québec agricole. La résolution de l'image est de 25 m sur 25 m.
- 2) À la suite d'une entente de service avec la Financière agricole du Québec (FAQ), la base de données des cultures généralisées (BDCCG) est également intégrée au serveur. Le produit est constitué de polygones représentant les parcelles agricoles assurées par les producteurs dans les programmes

de la FAQ. Ces polygones ont été généralisés et regroupés selon la culture déclarée par l'assuré. Les classes utilisées sont les suivantes : foin, maïs, blé, orge, avoine, soya, canola, autres céréales, maraîcher, petits fruits, pas d'information.

- 3) Une série d'informations à caractère administratif comme :
 - la cartographie des unités d'aménagement forestier (UAF); cette couverture numérique présente les unités d'aménagement forestier pour l'ensemble du Québec méridional. La base géographique de référence est le Québec méridional à l'échelle de 1 : 1 250 000;
 - la cartographie des territoires fauniques; cette section décrit les différents types de territoires ayant un statut particulier ou faisant l'objet d'une protection particulière à l'égard de la faune en vertu de la Loi sur la conservation et la mise en valeur de la faune;
 - la cartographie des claims miniers et des baux de villégiature; ces deux cartographies produites par le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles couvrent l'ensemble du territoire québécois.

Réseau hydrographique

La majeure partie des données requises pour la production du CER mentionnées ci-dessus est disponible et peut être aisément obtenue en format électronique. Par contre, certaines données, quoiqu'indispensables, ne sont pas disponibles et on doit les produire. C'est le cas d'une part importante des données nécessaires pour considérer les aspects aquatiques du territoire. Les plans d'eau et les cours d'eau sont, dans l'ensemble, bien cartographiés, mais nous n'avons qu'une image statique du réseau hydrographique. Or, pour caractériser le territoire de manière intégrée comme le propose le CER, la dimension dynamique du réseau hydrographique (le sens de l'écoulement, les relations amont aval) et la magnitude des flux des eaux de surface sont indispensables. Ces données sur la dynamique du réseau et sur la magnitude des flux ont autant d'importance à l'égard des aspects aquatiques que les données altimétriques (courbes de niveau et données topographiques) en ont pour traiter les aspects terrestres.

Donc, pour représenter le sens d'écoulement et la magnitude des flux de surface en tout point du territoire, on doit produire des modèles d'écoulement de surface (une abstraction de la réalité) qui met à profit l'ensemble des données hypsométriques et hydrographiques d'une base de données topographiques; ces modèles reposent, simultanément, sur une structure vectorielle et une

structure matricielle. La première, composée de lignes, de points et de règles topologiques, représente le réseau hydrographique de surface observable. La deuxième, en format matriciel, traduit, en premier lieu, les directions des écoulements de surface et, en second lieu, leur accumulation; elle couvre le territoire au complet et tient compte ainsi de tous les écoulements de surface même s'ils sont éphémères, diffus ou trop faibles pour être cartographiés.

En pratique, on structure d'abord le réseau hydrographique vectoriel afin de représenter le réseau hydrographique de surface observable. Une fois structuré, ce réseau hydrographique est combiné aux données hypsométriques, ce qui permet la production, par interpolation matricielle, d'un MNA. C'est à partir de ce MNA que sont dérivées les informations sur la pente, l'exposition, la direction et l'accumulation d'écoulement.

Réseau hydrographique vectoriel topologique

Dans les informations numériques disponibles, le réseau hydrographique est représenté à la fois par des lignes (petits cours d'eau) et par des polygones (grands cours et plans d'eau). La connectivité entre toutes les parties est établie sur la base de lignes que l'on crée à l'intérieur des polygones (figure 2.34). On les produit à l'aide d'algorithmes basés sur le concept des polygones de Thiessen ou de Voronoï (Thiessen, 1911; Croley et Hartmann, 1985; Fortune, 1987). On crée ainsi un réseau logique basé sur la théorie des graphes mathématiques (Pemmaraju et Skiena, 2003) dans lequel on connaît, pour chaque jonction, la relation spatiale entre les segments et le sens d'écoulement de chacun d'eux (figure 2.34). Chaque ligne constituant le réseau est alors orientée (par le sens de numérisation) suivant le sens d'écoulement de l'eau.

La topologie décrit les relations spatiales entre les entités d'une couche d'information géographique.

Un réseau géométrique associe entre elles plusieurs classes d'entités spatiales. Il permet de créer des relations spatiales entre des points et des lignes, de réaliser des analyses de réseau et de calculer la direction des flux en attribuant, à certaines jonctions, les propriétés de source ou d'exutoire.

Un graphe est une représentation symbolique d'un réseau : c'est une abstraction de la réalité qui permet sa modélisation. De manière générale, un graphe permet de représenter simplement la structure, les connexions, les cheminements possibles d'un ensemble complexe comprenant un grand nombre de situations, en exprimant les relations, les dépendances entre ses éléments, réseau de communication, réseaux ferroviaire ou routier, réseau hydrographique.

(Gachet, 2004)



Figure 2.34. Création des lignes centrales et intégration du sens d'écoulement

Le réseau hydrographique est organisé selon les ordinations de Strahler (1957) et de Horton (1945). L'ordination de Strahler débute à la source des cours d'eau (cours d'eau de tête de bassin); tout cours d'eau sans affluent dont l'écoulement est permanent se voit attribuer la valeur 1. Ensuite, on incrémente la valeur attribuée à chaque segment de cours d'eau situé en aval à la confluence de deux cours d'eau d'ordre égal. À la confluence d'un cours d'eau d'ordre inférieur avec un cours d'eau d'ordre supérieur, c'est le numéro d'ordre de ce dernier qui subsiste (figure 2.35). On calcule l'ordre

de Horton en attribuant à des ensembles de lignes constituant un cours d'eau (de sa tête à son embouchure) l'ordre de Strahler maximal rencontré. L'organisation hiérarchique de Horton va servir de base à un système de référence linéaire pour se localiser sur le réseau. Ainsi, à chaque segment du réseau hydrographique, on attribue un numéro de route. Tous les segments adjacents de même ordre ont évidemment le même numéro. Ce système permet de se localiser en tout point sur le réseau à l'aide des fonctionnalités d'adressage basées sur la position d'un événement sur une route (figure 2.36).

Les données altimétriques (courbes de niveau, points cotés, contours des plans d'eau, etc.) et le sens des écoulements de l'eau de surface sont intégrés dans un calcul d'interpolation matricielle pour produire un MNA hydrologiquement cohérent (figure 2.37). Grâce à ce MNA, on peut alors modéliser la direction des écoulements de l'eau à la surface du sol en appliquant la méthode « D8 », développée d'abord par O'Callaghan et Mark (1984), puis par Jenson et Domingue (1988), ou des méthodes dérivées plus « sophistiquées » dans les cas de terrains faiblement accidentés (Tarboton, 1997; Orlandini et coll., 2003, Wang et Liu, 2006; Kenny et coll., 2008).



Figure 2.35. Intégration de l'ordination de Strahler

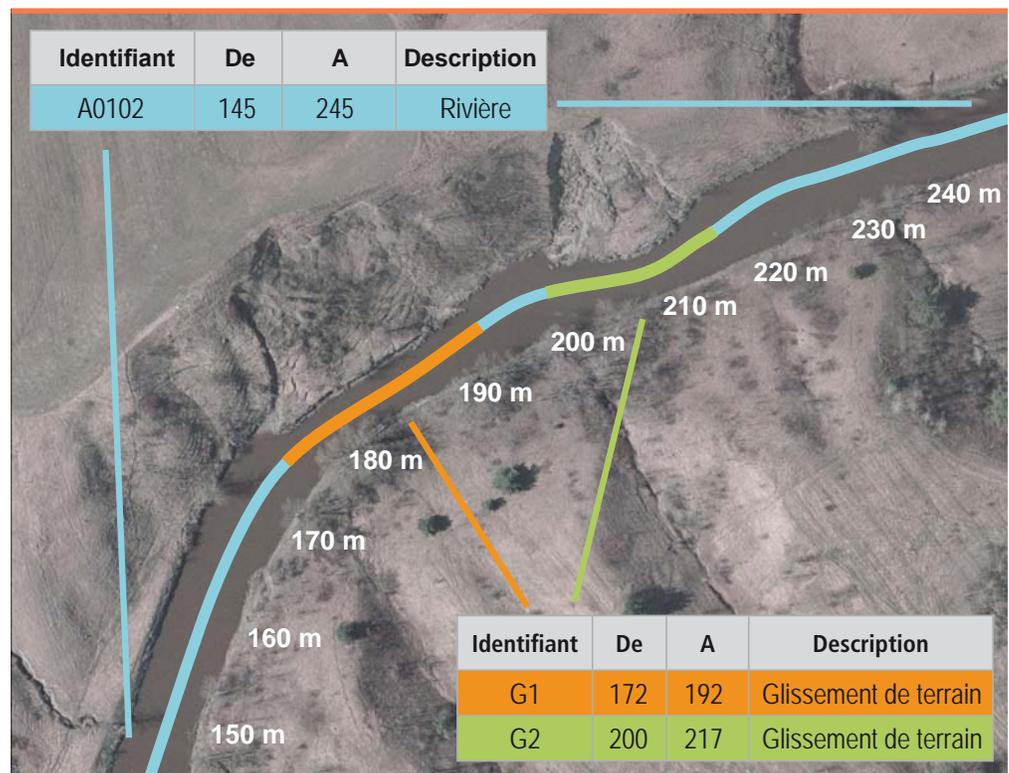


Figure 2.36. Création d'un système de référence linéaire

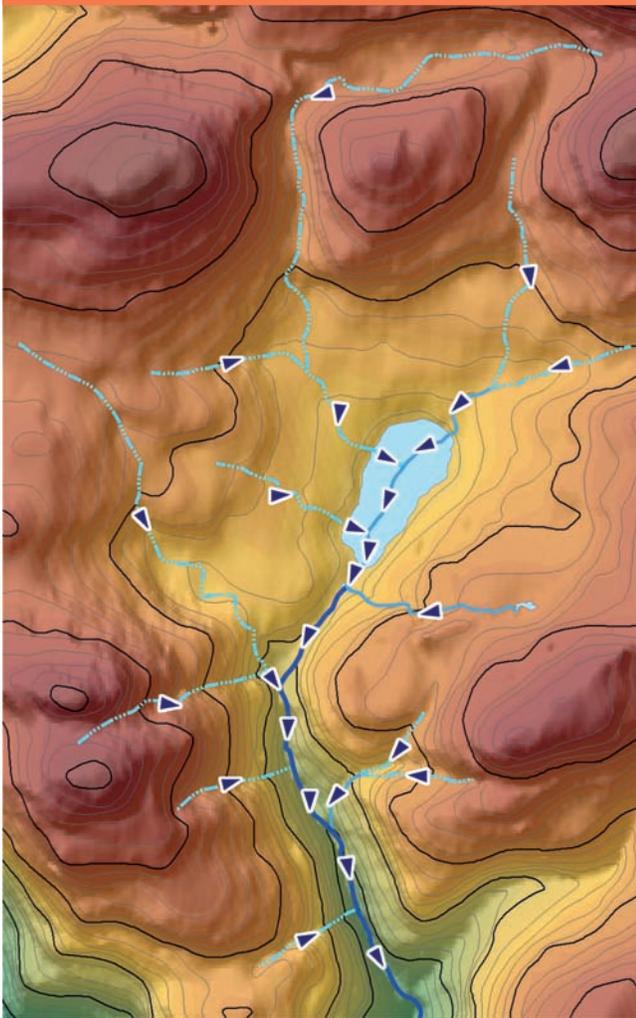


Figure 2.37. Création d'un modèle numérique d'altitude hydrologiquement cohérent

Une fois ces modélisations en place, on peut automatiquement déterminer, en tout point du territoire, la superficie amont qui l'alimente, c'est-à-dire son bassin versant. On se sert du réseau hydrographique structuré pour organiser, de manière logique, l'ensemble des aires de contribution de chacun de ses éléments (segments de cours d'eau, lacs, milieux humides, etc.). Il est aussi possible de calculer, à l'aide d'algorithmes appropriés, plusieurs indices liés à l'écoulement de l'eau à la surface du sol : l'accumulation de surface drainée, la pente d'écoulement, la distance parcourue par l'écoulement et l'indice de saturation des sols qui intègre la pente locale et l'accumulation de surface drainée (Beven et Kirkby, 1979) (figure 2.38).

Toutes ces informations ont une importance cruciale pour les interprétations territoriales du CER grâce auxquelles se matérialise l'intégration des dimensions terrestres et aquatiques.

2.4.6 Outils de terrain

À côté des outils traditionnels que sont le stéréoscope, la pelle, la sonde pédologique ou encore l'appareil photo aujourd'hui numérique qui ont toujours cours lors des campagnes de terrain, l'ordinateur a supplanté le carnet de notes et les fiches papier. Par rapport à l'époque du « tout papier », la prise de notes est maintenant facilitée par l'information stockée dans l'ordinateur de terrain, que l'écologue peut consulter en temps réel. Cette information est évidemment fonction du projet, mais, de façon générale, elle contient les rubriques suivantes :

- les découpages cartographiques produits lors de la photo-interprétation préliminaire;
- les fonds de cartes nécessaires et adaptés au projet en cours (p. ex., BDTQ 20K, utilisation du sol);
- les orthophotos du territoire à inventorier;
- les fiches de terrain numériques conçues et adaptées au projet en cours;
- un vade-mecum des relevés écologiques sous la forme de menus déroulants (domaines de valeurs) pour chaque rubrique descriptive (localisation, topographie, géologie, dépôt de surface, description pédologique, couvert végétal, etc.);
- un champ « Note » qui permet de circonvier aux cas non prévus par le vade-mecum, mais effectivement rencontrés sur le terrain;
- chaque prise de notes est géoréférencée directement sur le terrain grâce au système de géoréférence spatiale (GPS) intégrée à l'ordinateur de terrain.

L'utilisation de l'ordinateur de terrain minimise les risques d'erreur par rapport à la prise de données manuelles, car les identifications ou les combinaisons de descripteurs erronées ne s'enregistrent pas et son contenu est directement transféré, sans aucune manipulation, dans l'ordinateur de bureau.

2.4.7 Outils de gestion des données

La géomatique repousse toujours un peu plus les limites du possible dans la production, la consultation et l'analyse de données à référence spatiale. En retour, elle amène de grands défis dans leur gestion. Cette facilité d'être aujourd'hui capable de multiplier l'information existante débouche souvent sur de sérieuses difficultés dans la production et l'analyse de données. Ainsi, la confusion s'installe rapidement lorsqu'on se retrouve devant un grand nombre de versions de la même information traitée par différentes personnes. L'utilisation d'un serveur central

de données et d'outils de gestion permettant l'édition à utilisateurs multiples s'impose pour éviter ces risques élevés de confusion. Grâce à ces outils, on peut faire un suivi rigoureux de l'évolution de la production des données, car ils gardent en mémoire les éventuelles modifications effectuées par les différents utilisateurs. Le CER est produit et consulté au moyen d'une telle structure informatique; pour qu'elle soit efficace, elle doit répondre à des règles topologiques rigoureuses établies par l'équipe de production et appliquées par le serveur central. Le serveur central de données permet ainsi à plusieurs membres de

l'équipe de production du CER de consulter simultanément et efficacement une très grande quantité de données à référence spatiale. Toute une panoplie de données y est stockée; ce sont surtout des données cartographiques accompagnées de fichiers descriptifs. Elles constituent le « noyau dur » de l'information à laquelle les membres de l'équipe font quotidiennement appel. Elles sont consultées et utilisées à tout moment, aussi bien par les photo-interprètes lorsqu'ils dressent la cartographie écologique de base que par les analystes lorsqu'ils montent les interprétations et les applications de la carte écologique.

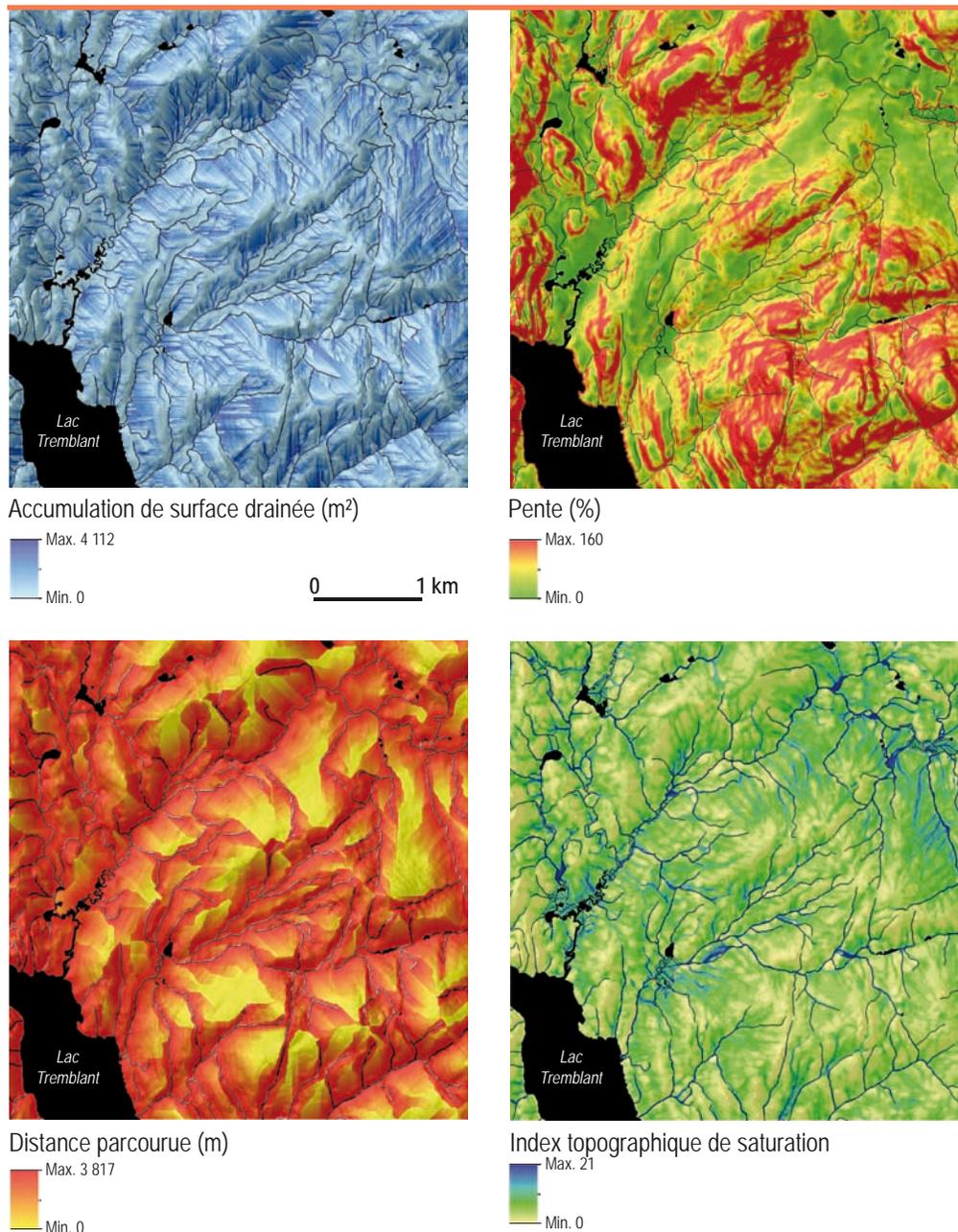


Figure 2.38. Indices d'écoulement de surface : accumulation de surface (m²); pente (%); distance (m); index topographique

2.5 Références bibliographiques

- AVRAMTCHEV, L. 1985. *Carte géologique du Québec au 1 : 1 500 000*. Québec, ministère des Ressources naturelles.
- BAILEY, R. G., 1996. *Ecosystem Geography*. New York, Springer Verlag, 204 p. + 2 cartes hors-texte.
- BAILEY, R. G., R. D. PFISTER et J. A. HENDERSON, 1978. « Nature of land and resource classification: a review ». *Journal of Forestry*, vol. 76, n° 10, p. 650-655.
- BEVEN, K. J., et M.-J. KIRKBY, 1979. « A physically based, variable contributing area model of basin hydrology ». *Hydrological Sciences Bulletin*, vol. 24, p. 43-69.
- BOUCHER, F., J.-BISSONNETTE, T. LI et C. SEUTHÉ, 1994. *Apport de la télédétection et des capacités de la géomatique à la cartographie écologique à petite échelle*. Québec, Projet conjoint entre la Direction de la conservation et du patrimoine écologique du ministère de l'Environnement et de la Faune et le Service des technologies à référence spatiale du ministère des Ressources naturelles, Rapport final B9405RO2, 65 p.
- CHRISTIAN, C. S., 1959. « The eco-complex in its importance for agricultural assesment ». Dans Keast A., R.L. Crocker et C. S. Christian (dir.) *Biogeography and Ecology in Australia*, série Monographiae Biologicae, vol. 8, p. 587-605.
- CORBÉ, C., 2004. « La vision ». *J3eA*, numéro hors-série 1, 7 p. [En ligne], [[dx.doi.org/10.1051/bib-j3ea:2004601](https://doi.org/10.1051/bib-j3ea:2004601)].
- CROLEY, T. E., et H. C. HARTMANN, 1985. « Resolving Thiessen polygons ». *Journal of Hydrology*, vol. 76, n° 3 4, p. 363-379.
- DUCRUC, J.-P., 1985. *L'analyse écologique du territoire au Québec – L'inventaire du Capital-Nature de la Moyenne-et-Basse-Côte-Nord*. Environnement Canada, Environnement Québec, série d'inventaire du Capital-Nature, n° 6, 145 p.
- DUCRUC, J.-P., et D. BÉRUBÉ, 1979. *Le système écologique : unité de base de la cartographie écologique du territoire de la Baie-James*. Ottawa, Environnement Canada, Série de la classification écologique du territoire, n° 10, 64 p. (également en version anglaise).
- DYKE, A. S., 2004. « An outline of North American deglaciation with the emphasis on central and northern Canada ». Dans Ehlers, J., et P.L. Gibbard (dir.), *Quaternary Glaciation – Extent and Chronology, part II : North America*, Elsevier B.V., p. 373-424.
- EGLER, F. E., 1942. « Vegetation as an object of study ». *Philosophy of Science*, vol. 9, n° 3, p. 245-260.
- FORTUNE, S., 1987. « A Sweepline Algorithm for Voronoi Diagrams ». *Algorithmica*, vol. 2, n° 1, p. 153-174.
- GACHET, A. 2004. *Building Model-Driven Decision Support Systems with Dicosess*. Zurich, VDF, 258 p.
- GELUCK, P., 2006. *Le tour du chat en 365 jours*. Paris, Éditions Play Bac.
- GERARDIN, V., et D. MCKENNEY, 2001. *Une classification climatique du Québec à partir de modèles de distribution spatiale de données climatiques mensuelles : vers une définition des bioclimats du Québec*. Québec, ministère de l'Environnement, Direction du patrimoine écologique et du développement durable, 40 p.
- GRIGG, D., 1965. « The logic of regional systems ». *Annals of the Association of American Geographers*, vol. 55, n° 3, p. 465-491.
- JENSON, S. K., et J. O. DOMINGUE, 1988. « Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis ». *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 54, n° 11, p. 1593-600.
- HORTON, R. E., 1945 « Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology ». *GSA Bulletin*, vol. 56, n° 3, p. 275-370.
- JURDANT, M., et J.-P. DUCRUC, 1979. *Carte écologique du territoire de la Baie-James : districts écologiques et géomorphologie (légende détaillée)*. Ottawa, Environnement Canada, Série de la classification écologique du territoire, n° 11, 30 p. + 1 carte.
- KENNY, F., B. MATTHEWS et K. TODD, 2008. « Routing overland flow through sinks and flats in interpolated raster terrain surfaces ». *Computers and Geosciences*, vol. 34, n° 11, p. 1417-1430.
- KOESTLER, A., 1969. « Beyond atomism and holism – the concept of the holon ». Dans Koestler, A, et J. R. Smithies (dir.), *Beyond reductionism : New perspectives in the life sciences*. Londres, Hutchinson of London, p. 192-216.
- LAMONTAGNE, L., 1992. *Pédo-paysage du Canada, Québec-Central*. Inventaire des terres du Canada, Équipe pédologique du Québec, Centre de recherche sur les terres et les ressources biologiques, Direction générale de la recherche, Agriculture Canada, Sainte-Foy. Contribution n° 92 130, 1 carte au 1 : 1 000 000.
- LAMONTAGNE, L., 1993. *Pédo-paysage du Canada, Québec-Sud-Est*. Inventaire des terres du Canada, Équipe pédologique du Québec, Centre de recherche sur les terres et les ressources biologiques, Direction générale de la recherche, Agriculture Canada, Sainte-Foy. Contribution n° 92 195, 14 p. + 1 carte au 1 : 1 000 000.
- LAMONTAGNE, L., et J. Y. DROLET. 1992. *Pédo-paysage du Canada, Québec-Sud-Ouest*. Inventaire des terres du Canada, Équipe pédologique du Québec, Centre de recherche sur les terres et les ressources biologiques, Direction générale de la recherche, Agriculture Canada, Sainte-Foy. Contribution n° 89-02, 32 p. + 1 carte au 1 : 1 000 000.
- NAVEH, Z., 2001. « Ten major premises for a holistic conception of multifunctional landscapes ». *Landscape and Urban Planning*, vol. 57, n° 3 4, p. 269-284.
- NAVEH, Z., et A. S. LIEBERMAN, 1994. *Landscape Ecology. Theory and application, 2e édition*. New York, Springer Verlag, 360 p.

- O'CALLAGHAN, J. F., et D. M. MARK, 1984. « The extraction of drainage networks from digital elevation data ». *Computer Vision, Graphics, and Image Process*, vol. 28, no 3, p. 323-344.
- ORLANDINI, S., G. MORETTI, M.-FRANCHINI, B. ALDIGHERI et B. TESTA, 2003. « Path-based methods for the determination of nondispersive drainage directions in grid-based digital elevation models ». *Water Resources Research*, vol. 39, n° 6, p. 1144/1-8.
- PEMMARAJU, S., et S. SKIENA, 200. *Computational Discrete Mathematics: Combinatorics and Graph Theory in Mathematica*. Chapitre 8, sections 8.1.2, « All-Pairs Shortest Paths », et 8.5.2, « Transitive Closure and Reduction », Cambridge, Cambridge University Press, p. 330-331 et 353-356.
- ROWE, J.-S., 1961. « The level of integration concept and ecology ». *Ecology*, vol. 42, n° 2, p. 420-427.
- ROWE, J.-S., 1993. « Eco-diversity. The key to biodiversity ». Dans Iacobelli, T., K. Kavanagh et S. Rowe, *A protected areas gap analysis methodology: planning for the conservation of biodiversity*, Toronto, Fonds mondial pour la nature, p. 2-9.
- ROWE, J.-S., et J. W. SHEARD. 1981. « Ecological land classification: a survey approach ». *Environmental Management*, vol. 5, n° 5, p. 451-464.
- SERVICE CANADIEN DE LA FAUNE et COLL., 2004. *Occupation du sol à partir des images classifiées Landsat 7, Sud du Québec, 1999-2003*. Québec, Environnement Canada, région du Québec.
- SCHULTZ, A. M., 1969. « A study of an ecosystem: The arctic tundra ». Dans Van Dine, G. M. (dir.), *The ecosystem concept in natural resource management*, New York, Academic Press, p. 77-93.
- SMUTS, J. C., 1926. *Holism and evolution* (2^e édition, 1971). New York, Viking Press, 319 p.
- STRAHLER, A., 1957. « Quantitative analysis of watershed geomorphology ». *Transactions of the American Geophysical Union*, vol. 38, n° 6, p. 913-920.
- SOKAL, R. R., 1974. « Classification: purposes, principles, progress, prospects ». *Science*, vol. 185, n° 4157, p. 1115-1123.
- TANSLEY, A. G., 1935. « The use and abuse of vegetational concepts and terms ». *Ecology*, vol. 16, n° 3, p. 284-307.
- TARBOTON, D. G., 1997. « A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models ». *Water Resources Research*, vol. 33, n° 2, p. 309-319.
- THÉRIAULT, R., 2002. *Carte géologique du Québec – Édition 2002*. Québec, ministère des Ressources naturelles, DV 2002-06, 8 p. + carte.
- THÉRIAULT, R., et S. BEAUSÉJOUR, 2012. *Carte géologique du Québec – Édition 2012*. Québec, ministère des Ressources naturelles, DV 2012-06, 8 p. + carte.
- THIESSEN, A. H., 1911. « Precipitations average for large areas ». *Monthly Weather Review*, vol. 39, p. 1082-084.
- WANG, L., et H. LIU, 2006. « An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling ». *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 20, n° 2, p. 193-213.
- WEISS, P. A., 1969. « The living system: determinism stratified ». Dans Koestler, A., et J. R. Smithies (dir.), *Beyond reductionism: New perspectives in the life sciences*. Londres, Hutchinson of London, p. 3-55.
- YARBUS, A. L., 1967. *Eye Movements and Vision*. New York, Plenum Press, 222 p.
- ZONNEVELD, I. S., 1990. « Scope and concepts of landscape ecology as an emerging science ». Dans Zonneveld, I.S., et R. T. Forman (dir.), *Changing landscapes: an ecological perspective*, New York, Springer Verlag, p. 3-20.