GÉNÉRALISATION AUTOMATIQUE DU LINÉAIRE : QUELQUES OUTILS POUR MESURER LA FORME DES ROUTES

Par Xavier BARILLOT
Laboratoire COGIT IGN 2 avenue pasteur 94160 Saint-Mandé
Mél: Xavier.Barillot@ign.fr

Résumé

Le contexte est la généralisation automatique et indépendante du linéaire *et plus particulièrement celle des routes : nous disposons d'une polyligne (suite ordonnée de points représentant une route) trop détaillée et qu'il faut transformer pour la représenter à une échelle inférieure. Qu'il s'agisse de savoir quelle opération effectuer sur cette polyligne (lissage, filtrage, caricature, ...) ou bien de valider le résultat obtenu (qualité intrinsèque et comparaison avec la polyligne origine), des outils sont nécessaires : il s'agit entre autres de mesures de position, de topologie et surtout de* forme.
La caractérisation de la forme d'une polyligne pose divers problèmes dont le premier est dû à sa nature discrète : cette caractérisation devra être indépendante du niveau de détail de la saisie. Il faudra soit créer des outils indépendants de cette nature discrète, soit prévoir un prétraitement des polylignes destiné à les rendre continues; c'est cette dernière optique qui a été retenue: on travaille sur des modélisations de polylignes; plusieurs modélisations polynomiales ont été étudiées, dont celle par paraboles/cubiques.
Ensuite, la caractérisation de forme d'une polyligne peut se concevoir à des niveaux très différents, allant du global (sinuosité, ...) jusqu'au très local (forme d'un virage, ...). Sachant qu'on a toujours la possibilité de construire le global à partir du local, l'accent est mis actuellement sur le deuxième niveau, sans toutefois oublier le premier.
Le problème central est donc de trouver et d'analyser des outils de détection et de caractérisation des virages. Après avoir constaté les difficultés pour délimiter de façon perceptible les virages, nous montrerons les faiblesses de la définition classique en généralisation pour la partie d'une courbe située entre deux points d'inflexion. Ensuite, nous étudierons dans quelle mesure le calcul de la courbure peut permettre d'isoler les virages. Puis, il restera à fixer les paramètres nécessaires et suffisants pour caractériser un virage, sans perdre de vue notre objectif de généralisation. Pour conclure, nous verrons les problèmes posés par le passage du niveau local au niveau global.

INTRODUCTION

Pour généraliser automatiquement une route, nous disposons d'une palette d'algorithmes très variée (filtrage, lissage, caricature, ...) qui nous permet de façon interactive de répondre à la plupart des cas réels. Le problème est de comprendre pourquoi, pour telle route ou tel tronçon de route, un algorithme avec tel paramétrage est choisi, pourquoi après tel algorithme et au vu du résultat, tel autre algorithme est lancé, pourquoi encore tel résultat a été jugé si insatisfaisant que l'opération est annulée et le processus réinitialisé.

Pour se donner les moyens de réaliser ces choix de manière automatique, nous proposons de qualifier les objets à transformer à deux niveaux: d'une part pour choisir l'algorithme adapté à la ligne et d'autre part pour évaluer la qualité du résultat (Cf. Figure 1). Concernant le premier niveau, on suppose que l'application, manuellement ou interactivement, d'un même algorithme ou d'une même opération à deux objets provient du fait qu'ils ont au moins une caractéristique en commun; de plus, on suppose que la qualification de cette caractéristique pourra permettre de fixer l'intensité avec laquelle cet algorithme va être appliqué, c'est-à-dire la valeur des paramètres. Deuxièmement, après application d'un algorithme, on estimera la qualité intrinsèque (acceptabilité) et extrinsèque (comparaison avec l'original) du résultat.

Ces outils qui vont nous permettre de qualifier et comparer les objets (routes initiale et généralisée), nous les appellerons des mesures [McMaster, 1983; Buttenfield, 1984]. Il pourra s'agir aussi bien de mesures évidentes comme la longueur de la route, le nombre de points d'intersection entre la route et sa correspondante lissée, que de plus complexes comme le nombre de virages ou la sinuosité. Comme nous l'avons mentionné ci-dessus, ces mesures vont être utiles principalement à deux niveaux dans le processus (phases 1 et 2 dans la Figure 1 et pour plus d'informations concernant le processus, nous renvoyons à [Ruas et al., 1996; Ruas, 1999]):

-Premièrement, elles vont nous permettre de décider quelle opération choisir ou quel algorithme utiliser pour traiter une ligne donnée. Ceci constitue bien entendu un gros problème qui est l'établissement des règles de correspondance entre les types de lignes caractérisées par ces mesures et les séquence d'algorithmes (des travaux sont en cours actuellement à l'IGN qui vont dans ce sens: ils sont entre autres basés sur des techniques d'apprentissage automatique en temps différé ou réel. Ce problème de mise en correspondance ne sera pas abordé ici : Cf. [Ruas, 1999]).

-Deuxièmement, ces mesures serviront à estimer la qualité du résultat donné par l'algorithme choisi. En effet, même si on suppose que la base de règles de correspondance est parfaite, il conviendra d'évaluer la qualité du résultat, éventuellement de proposer une autre valeur ou un intervalle de valeurs pour l'algorithme utilisé ou bien de proposer un autre algorithme à appliquer si le résultat intermédiaire est acceptable ou encore de revenir à l'état initial; lorsque le résultat obtenu est acceptable, il nous permettra d'enrichir et d'améliorer la base de règles (pour la mise en correspondance). Dans le cas contraire, la caractérisation sera mise en cause : il faudra créer d'autres outils de caractérisation, des mesures plus fines.

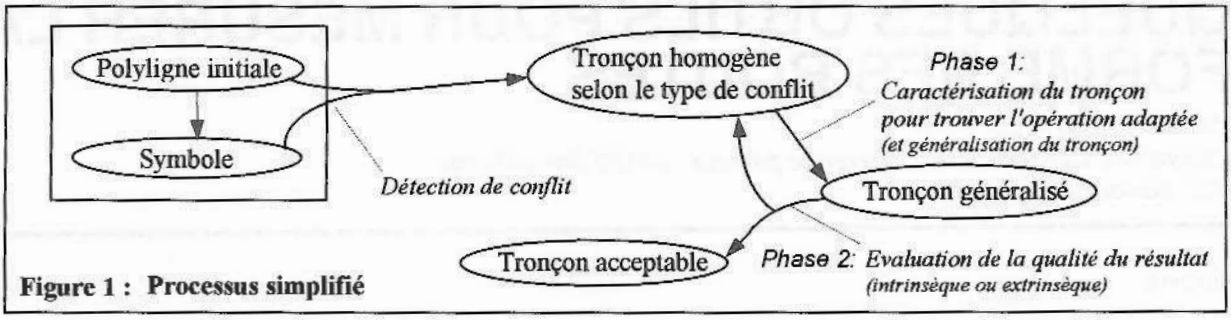


Figure 1 : Processus simplifié

Nous allons nous intéresser ici aux problèmes rencontrés et aux solutions envisagées pour les résoudre lorsqu'on cherche à qualifier la forme d'une ligne (qu'il s'agisse de caractérisation de la ligne de départ ou bien d'évaluation du résultat).

Notons que ce problème de reconnaissance de forme est récurrent dans d'autres domaines mais que la spécificité du point de vue de la généralisation nous contraint à reconsidérer le problème: en effet, dans notre domaine, les objets sont donnés et il ne reste qu'à qualifier leur forme, contrairement à l'analyse d'image par exemple, où le principal travail est de construire les objets à partir d'une représentation en mode raster. Néanmoins, les recherches déjà menées dans ces domaines peuvent nous être utiles: en particulier, il est reconnu qu'il est illusoire de chercher à décrire la forme d'un objet avec un seul indicateur, qui permettrait de distinguer les objets de forme différente et de regrouper les semblables.

1. MODÉLISATION

Les objets sur lesquels nous travaillons sont représentés par des *polylignes* consistant en une suite ordonnée de points, c'est-à-dire une ligne brisée représentant la route et ne pouvant pas s'auto-intersecter. Il s'agit d'une approximation qui va avoir un effet sur le résultat des mesures destinées à qualifier cette route. Pour une mesure de longueur, on peut supposer que le biais engendré est négligeable, mais pour calculer la pente, la courbure ou d'une façon générale qualifier la forme de la ligne, on conçoit facilement qu'il faille prévoir un prétraitement.

Une première méthode consiste à considérer la courbure de la ligne brisée comme une distribution qui est ensuite lissée (avec un lissage gaussien) plus ou moins fortement suivant le degré de sélection des détails désiré [Barrault, 1998; Fritsch, 1999]. La méthode choisie ici est différente: au lieu de partir de la courbure, nous partons de la polyligne elle-même que nous transformons pour la rendre dérivable en tous points. Ainsi, on pourrait qualifier la première méthode d'*ascendante* (on part de la courbure pour éventuellement remonter à la ligne) et la deuxième de *descendante* (la pente, puis la courbure sont déduites d'une modélisation de la ligne).

Nous proposons une interpolation polynomiale en cubiques et paraboles. Ce choix a premièrement l'avantage d'être simple au niveau du calcul, de faciliter l'analyse, et deuxièmement d'assurer le nombre de points d'inflexion minimal (Cf. ci-dessous le critère de choix du degré du polynôme). Entre chaque doublet de points consécutifs de la polyligne, nous interpolons un polynôme de dimension deux ou trois; la courbe qui est issue de ce processus est donc une suite de portions de cubiques et de paraboles.

D'abord, nous assurons la dérivabilité de cette courbe en chacun des points de la polyligne en imposant que les pentes à gauche et à droite, c'est-à-dire les pentes des polynômes choisis de part et d'autre de chaque point, soient égales. De plus, afin d'éviter une dérive (oscillations grandissantes de la courbe) pendant la construction de la courbe, nous imposons une valeur pour les pentes aux points de la polyligne, avant le calcul des polynômes: en un point donné, la valeur de la pente est fixée à celle de la droite joignant les deux points voisins (Cf. Figure 2 : la pente en P_2 est celle de la droite P_1P_3); notons qu'étant donné que les points sont ordonnés, on tiendra compte du sens de parcours: les angles des pentes seront donc compris dans un intervalle [0,2∂]; par exemple, une pente d'angle ∂/2 ne sera pas équivalente à une pente d'angle 3p/2: dans le premier cas, la courbe arrive au point par en-dessous et dans l'autre, par au-dessus. Nous résumons ci-dessous les paramètres de cette interpolation pour un segment $[P_i,P_{i+1}]$ de la polyligne:

(1) a. Le polynôme doit passer par les points P_i et P_{i+1}.

b. Les angles de pente en P_i et P_{i+1} sont imposés dans [0,2p]: resp. angles du vecteur $P_{i-1}P_{i+1}$ et du vecteur P_iP_{i+2}.

Ensuite, il faut se donner le critère de choix pour le degré du polynôme; on ne choisira naturellement une cubique que lorsqu'on a un changement de progression de la pente des segments et donc un point d'inflexion; dans tout les autres cas, l'interpolation sera parabolique. Le processus de modélisation proposé comporte donc trois étapes rappelées ci-dessous:

(2) a. Calcul des pentes en chacun des points de la polyligne initiale.

b. Détermination du type de polynôme (parabole ou cubique) pour l'interpolation.

c. Interpolation entre deux points successifs de la polyligne avec contraintes de pente.

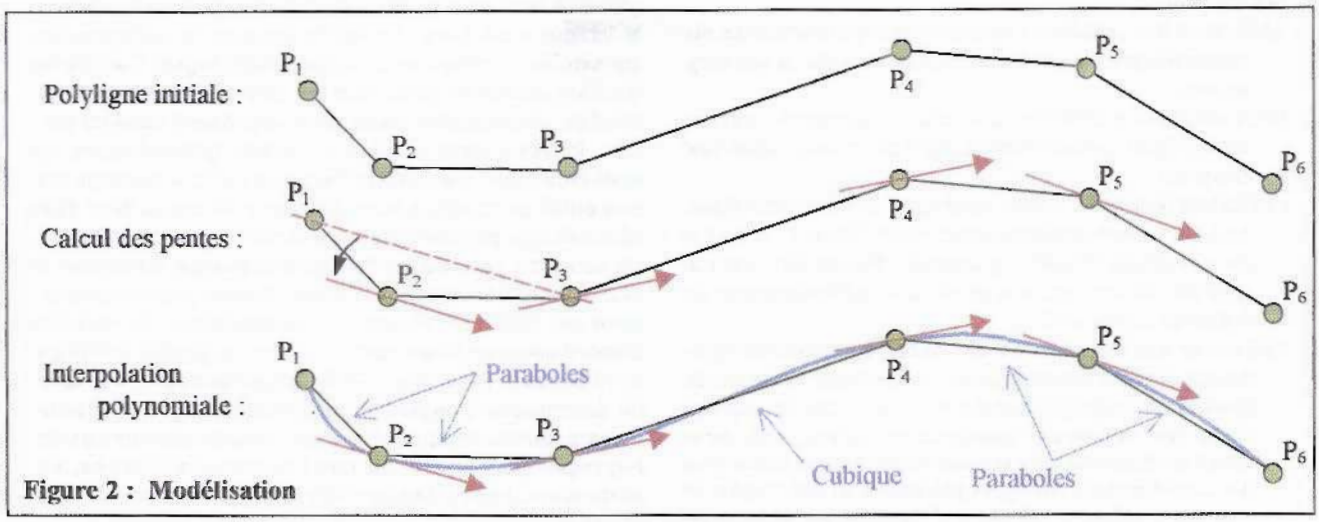


Figure 2 : Modélisation

Notons que la propriété de non auto-intersection des polylignes impose pour les pentes aux extrémités d'un segment des valeurs telles qu'il existe toujours *une* parabole (unique) et une *infinité* de cubiques obéissant aux contraintes fixées en (1). Le choix de la cubique est guidé par le souci de proximité entre modélisation et polyligne (i.e. cubique et segment); elle est calculée dans le repère dont l'axe des abscisses est la bissectrice des pentes aux extrémités du segment considéré.

À la place d'une ligne brisée, nous disposons à présent d'une courbe dérivable; cette modélisation va nous être utile pour caractériser la forme de la route, le calcul de la courbure sur la polyligne étant impossible puisqu'elle n'est pas dérivable.

2. ÈVALUATION DE LA FORME D'UNE POLYLIGNE

2.1 Qu'est-ce que la forme d'une polyligne ?

Commençons par délimiter ce que nous entendons par *forme*, sans perdre de vue que l'objet que nous cherchons à caractériser, une polyligne, est en relation avec un objet réel sur le terrain (une route) par l'intermédiaire d'un objet cartographique avec une symbolisation donnée: pour chacun de ces trois niveaux, le concept de forme peut se définir par contraste avec les autres paramètres de description (position, orientation, taille, densité, ...). En figure 3, dans le but de fixer les choses, on a des exemples d'objets ne variant que par l'un de ces concepts :

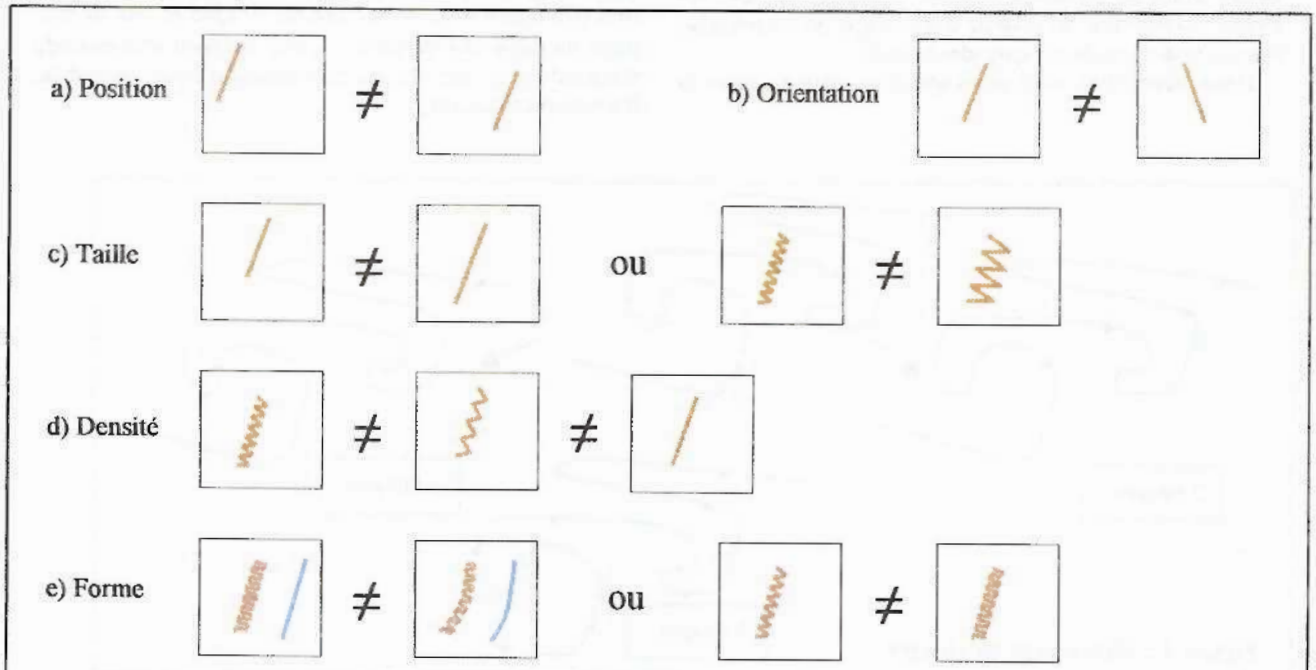


Figure 3 : Paramètres de description d'une ligne

Lorsqu'on compare deux objets, on peut effectuer les tests suivants:

a) Evaluer leur *position*: une translation permet de les superposer (rem: la position d'un objet est celle de son barycentre).

b) Evaluer leur *orientation*: une rotation permet de les confondre (rem: certains objets n'ont pas d'orientation (ex: disques).

c) Evaluer leur *taille*: on se ramène à une taille identique, soit par une homothétie dont le centre est le centre de gravité de l'objet (à gauche en Figure 3c), soit par une affinité orthogonale dont l'axe est l'orientation de l'objet (à droite en 3c).

d) Evaluer leur *densité*: une affinité orthogonale d'axe perpendiculaire à l'orientation et passant par le centre de gravité de l'objet permet de rendre les objets équivalents (rem: la taille de l'objet ne sera pas conservée, car le calcul de densité repose sur une caractéristique locale: il ne se conçoit que sur des lignes présentant un motif répété de manière sensiblement identique; il faut noter que les concepts de densité, de taille et de forme sont très liés).

e) Comparer leur *forme*: une fois réalisés les quatre tests ci-dessus, si les deux objets sont superposables, c'est qu'ils ont la même forme (rem: on verra plus bas que la forme d'un objet peut se concevoir à plusieurs niveaux allant du global au local).

Ainsi, une différence de forme entre deux objets est tout ce qui ne pourra pas être résorbé par une transformation simple globale (translation, rotation, homothétie et affinité). Il s'agira de ce qui est invariant par translation, rotation, ... (ce qui est le cas en particulier de *la dérivée seconde de la polyligne*, c'est-à-dire *la courbure, les inflexions, ...).*

A présent que nous avons une vision plus claire de ce que recouvre ici le concept de *forme*, voyons comment s'y prendre pour l'appréhender. Commençons par remarquer, comme on le constate en e) dans la figure 3 ci-dessus, que la forme d'une ligne peut se concevoir à plusieurs niveaux allant du *global* (à gauche) jusqu'au très *local* (à droite: c'est-à-dire au niveau d'un virage ou éventuellement d'une série de virages identiques).

Deux approches sont envisageables pour qualifier la forme d'une ligne, soit nous considérons la ligne dans sa globalité, soit nous partons d'un niveau plus bas, à savoir le virage: dans cette deuxième optique, la polyligne est considérée comme une succession de virages. C'est cette dernière approche qui sera privilégiée dans cette communication et à laquelle nous allons à présent nous consacrer. Indépendemment des impératifs géométriques ou mathématiques, ceci se justifie par le fait que le virage est une entité primordiale aussi bien pour le conducteur d'un véhicule que pour le lecteur de la carte, que ce soit dans un souci de sécurité ou de reconnaissance du terrain. Il faut d'abord décomposer la ligne (dans le processus proposé par l'IGN (Cf. Figure 1 en introduction), la ligne est d'abord segmentée en portions selon le type de conflit de symbolisation [Mustière, 1995]; l'objet de départ est donc de décomposer une portion de ligne en virages et ensuite de caractériser chaque virage, puis éventuellement les de regrouper pour construire des tronçons homogènes, en particulier du point de vue de la forme, ce qui donne trois phases :

(3) a. Décomposition en virages (niveau *micro*).

b. Caractérisation de chaque virage (forme, taille, orientation, ...).

c. Regroupement en tronçons homogènes / Caractérisation de la forme de la ligne (niveau *macro*).

Il ne sera question ici que des deux premières étapes, mais avant même de considérer la première, il convient d'étudier ce qu'on peut entendre par *virage* et comment accéder à cette entité.

2.2 Le concept de virage

2.2.1 Qu'est-ce qu'un virage ?

La réponse n'est pas facile, on s'en aperçoit dès qu'on essaie de décomposer des courbes un peu complexes. Bien sûr, il est fréquent d'avoir des hésitations sur la localisation du début et de la fin d'un virage, mais plus grave, il arrive aussi qu'on obtienne un nombre de virages différent (Cf. figure 4 où le nombre de virages et leur découpage va dépendre du point de vue qui peut être celui du dessinateur de la carte, du conducteur d'une automobile, d'un mathématicien, ...).

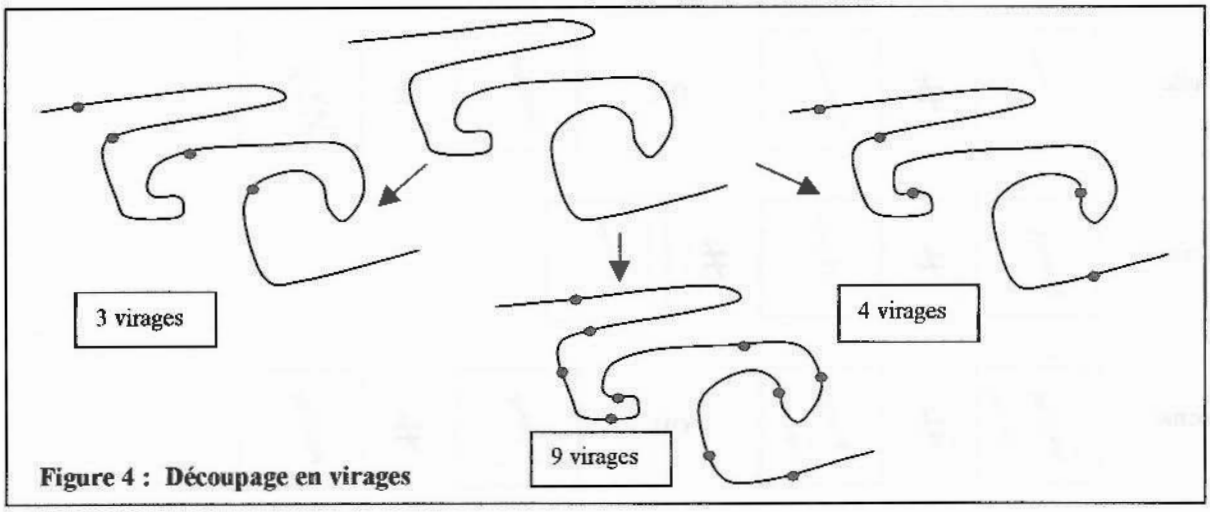


Figure 4 : Découpage en virages

On constate donc que la notion de virage est loin d'être évidente, même si, dans la plupart des cas, on constate un relatif consensus sur le découpage (en particulier sur le nombre de virages). Il reste à présent à relier ces intuitions à des critères mathématiques.

La définition la plus courante est «tronçon maximal de même concavité», c'est-à-dire la *portion de courbe comprise entre deux points d'inflexion consécutifs*. Mais, on pourrait aussi donner d'autres définitions comme par exemple *portion de courbe comprise entre deux parties droites*. Selon qu'on choisit l'une ou l'autre de ces deux définitions, le découpage est dans certains cas sensiblement différent, comme on le constate dans la figure 5 :

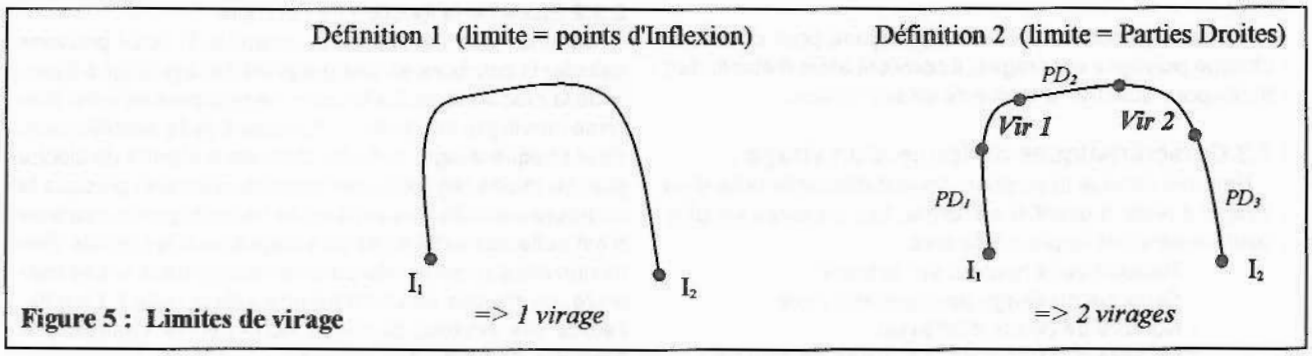


Figure 5 : Limites de virage

Selon les cas, nous choisirons l'une, l'autre ou les deux définitions. De toute façon, il faudra prévoir le calcul des parties droites et des points d'inflexion (et plus largement de la courbure) pour chaque polyligne dont nous voulons caractériser la forme. Comme nous allons le voir dans les sections suivantes, ces deux résultats seront indispensables, que ce soit au niveau de la segmentation en virages ou de leur caractérisation.

2.2.2 Les outils de détection des virages et leurs inconvénients

Le calcul des *points d'inflexion* est basé sur la modélisation présentée en partie 1; il y en a un pour chaque segment interpolé par une cubique. On obtient donc une série de points comme dans la figure ci-dessous:

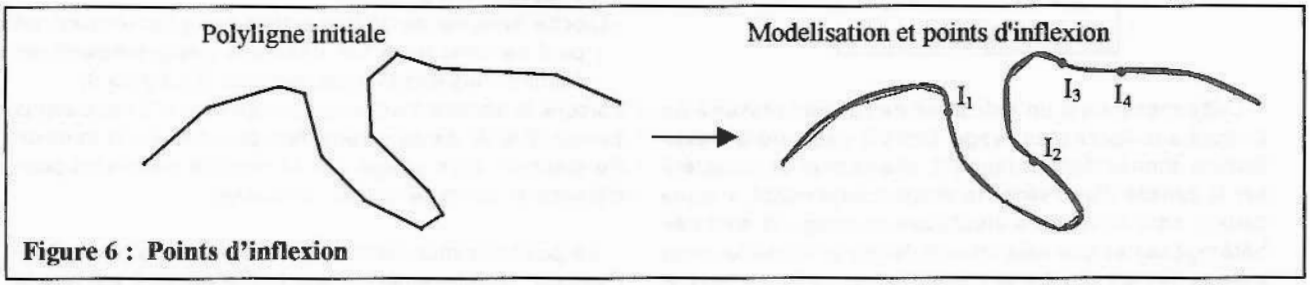


Figure 6 : Points d'inflexion

Dans la figure 6, on constate l'émergence de plusieurs problèmes. D'abord, on aimerait négliger certains virages par rapport à d'autres (par exemple, celui délimité par I_3 et I_4). Ensuite, les points d'inflexion ne sont pas toujours placés face à face comme c'est le cas du virage délimité par I_1 et I_2, ce qui complique la caractérisation des virages, en particulier le calcul de l'amplitude ou de la base. La délimitation des virages à partir des points d'inflexion est donc une première étape, mais insuffisante. Nous verrons en 2.2.3 des moyens de résoudre ces problèmes.

La détection des *parties droites* d'une courbe (i.e. modélisation polynômiale d'une polyligne) pose le problème du choix du seuil; en effet, vu que la courbe en question est une succession de paraboles et de cubiques, elle ne comprend jamais de segments de droite. Un tronçon de la courbe sera donc dit *partie droite* si la courbure en chacun de ses points est inférieure à un seuil donné. Toute la difficulté réside dans le choix de ce seuil.

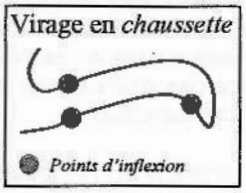
2.2.3 Propositions pour un meilleur découpage en virage

Lorsqu'on découpe une ligne en virages d'après la position des points d'inflexion, trois principaux problèmes surgissent:

a) Mauvaise délimitation des virages (Cf. virage I_1I_2 dans la figure 6):

Une solution peut être de calculer les parties droites de la ligne modelisée; sauf exception, chaque point d'inflexion est inclus dans une partie droite. La méthode consiste alors à choisir les limites des virages dans ces parties droites.

b) Virages en *chaussette* (Cf. figure ci-dessous) :



Nous avons un cas de virage particulièrement typique dans le linéaire routier en zone montagneuse, appelé *virage en chaussette* (Plazanet, 1996), et que le découpage par les points d'inflexion ne permet pas de constituer. Il faut donc prévoir autre chose comme par exemple :

- Considérer les virages dont la différence des angles de pente aux extrémités est supérieure à π (rem : on rappelle que les pentes sont orientées et les angles compris dans $(0,2\pi)$.
- Calculer la pente et la position du point suivant et les comparer avec celles du 1er point.

c) Pas de hiérarchisation des virages (Cf. virage I_3I_4 par rapport au virage I_1I_2 dans la figure 6):

Pour détecter les virages secondaires (ou du moins, la présence de différents niveaux), deux méthodes sont utilisées:

- Test si une portion comprise entre deux points d'inflexion consécutifs appartient à une partie droite.
- Calcul des différences de pente entre deux points d'inflexion consécutifs et classification des virages en fonction.

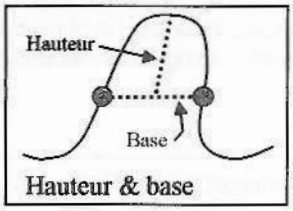
Nous disposons à présent de moyens pour découper chaque polyligne en virages; il convient alors d'établir des outils pour qualifier la forme de chacun d'eux.

2.3 Caractéristiques de forme d'un virage

Une fois connue la position, l'orientation et la taille d'un virage, il reste à qualifier sa forme. Les mesures les plus couramment citées pour cela sont:

- Rapport de la hauteur sur la base.
- Symétrie du virage par rapport à l'axe.
- Nombre de points d'inflexion.
- Nombre d'extrema de la fonction de courbure.
- ...

2.3.1 *Calcul de la hauteur/base* (Cf. Figure ci-dessous)



Cette mesure est un indicateur de l'aspect resserré ou au contraire épaté d'un virage. Dans le cadre de la classification donnée dans la figure 3, elle permet de caractériser la densité d'une série de virages; cependant, lorsque ceux-ci sont en nombre insuffisant ou lorsqu'ils sont très hétérogènes et que cela interdit de parler de *série*, cette mesure devient simplement un indicateur de forme de chaque virage.

La hauteur/base est basée sur leur délimitation, problème déjà évoqué plus haut dans la section 2.2. Ainsi, pour des virages très resserrés, on n'aura pas de problèmes pour calculer la base, contrairement à la hauteur, tandis que c'est l'opposé pour les virages épatés : les conséquences d'une erreur de localisation des limites de virage sont en effet moins importantes sur le cacul de la base que sur celui de la hauteur dans le cas de virages resserrés. Si on ne dispose pas d'une bonne délimitation, on peut proposer le processus suivant:

a) On détermine si un virage est resserré ou épaté : pour cela, on peut calculer la hauteur/base *brute*, c'est-à-dire avec la délimitation basée sur les points d'inflexion, ainsi que le *vecteur orientation* du virage et le degré de resserrement sera donné par le quotient de la norme du vecteur par la distance séparant les points d'inflexion.

Méthode de calcul du vecteur d'orientation :

1. se placer dans un repère où l'abscisse des points d'inflexion I_1 et I_2 est nulle.

2. Déterminer le point M_0 où la dérivée s'annule.

3. Calculer le symétrique P_0 de I_2 par rapport à M_0.

4. Le résultat est la somme des vecteurs I_1M_0 et M_0P_0.

b) Si le virage est épaté, on base le calcul sur la délimitation existante.

c) Si le virage est resserré, on en calcule l'orientation et on en place les limites sur la droite perpendiculaire à l'orientation et passant par le milieu des points d'inflexion.

d) Dans ces deux cas, une vérification pourra être faite sur la délimitation choisie en considérant les parties droites et les distances aux sommets de part et d'autre.

2.3.2 *Etude de la fonction de courbure*

Comme nous l'avons vu au chapitre 1, nous pouvons calculer la courbure en chaque point de la polyligne à partir de la modélisation. La fonction de courbure associe abscisse curviligne et courbure d'un point de la modélisation. Pour chaque virage, cette fonction est en forme de cloche plus ou moins régulière (convexe ou concave) puisque la courbure est nulle aux extrémités (notons que la courbure n'est nulle aux extrémités du virage que si les points d'inflexion ont été conservés comme limites; dans le cas contraire, on n'a pas exactement une valeur nulle.). Ensuite, l'étude des extrema de cette cloche permet d'établir une typologie de forme des virages:

- Cloche avec *un seul* extremum: dans ce cas, la forme du virage est comparable à celle de la courbure, cette dernière étant généralement plus resserrée (Cf. figure 7). De tels virages seront appelés *pointus*.
- Cloche avec *trois* extrema: si les deux maxima ont la même intensité et que le minimum les séparant est conséquent, on aura des virages dits *émoussés* (Cf. figure 8). Dans le cas contraire, on est ramené à des virages *pointus*.
- Cloche avec *au moins cinq* extrema: le plus souvent, on peut se ramener à l'un des deux cas précédents en éliminant les extrema secondaires (Cf. figure 9).

Lorsque le nombre d'extrema est supérieur à 3, nous avons besoin d'outils de caractérisation plus fins de la fonction de courbure d'un virage que le nombre d'extrema pour déterminer son type (pointu, émoussé, ...).

Le point commun de tous les virages de la figure 7 ci-dessous, corrolairement à leur forme *pointue*, est que la détermination du sommet ne pose pas de problème. Les critères manquants pour caractériser leur forme sont principalement l'aspect plus ou moins épaté (donné par la *hauteur/base* qu'on a vu ci-dessus) et la symétrie.

Dans la figure 8 , nous avons deux virages émoussés (le premier et le dernier); les deux pics de courbure sont comparables. Dans l'exemple du milieu, bien que la fonction de courbure comporte trois extrema, nous n'avons pas affaire à un virage émoussé; le premier pic de courbure est en effet plus important que le deuxième (nous verrons plus loin d'autres critères pour distinguer ces cas des virages vraiment émoussés).

Une première expérimentation nous a permis de mettre au point quelques mesures pour déterminer le type de virage d'après la fonction de courbure et fixer certains seuils : par exemple, selon les notations de la Figure 10, si les conditions $\{0.8<E_1/E_5<1.25\}$ et $\{E_3/\min(E_1,E_5)<0.4\}$ sont vérifiées, on peut penser qu'on a affaire à un virage *émoussé*.

Notons qu'aucune mesure à elle seule ne peut donner le type du virage; cependant, tel résultat donné par une mesure nous amènera à calculer une autre mesure pour le confirmer. Ceci implique de fixer un ordre de calcul des mesures.

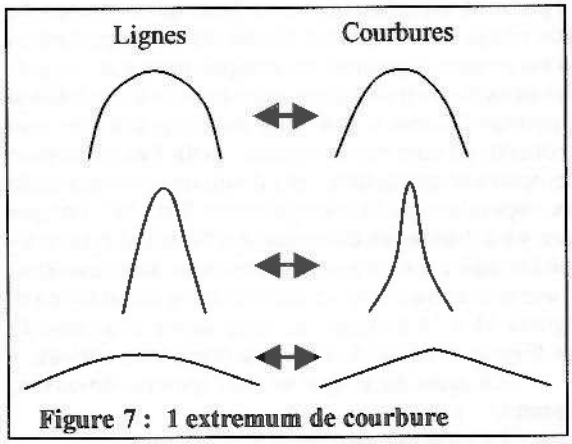


Figure 7 : 1 extremum de courbure

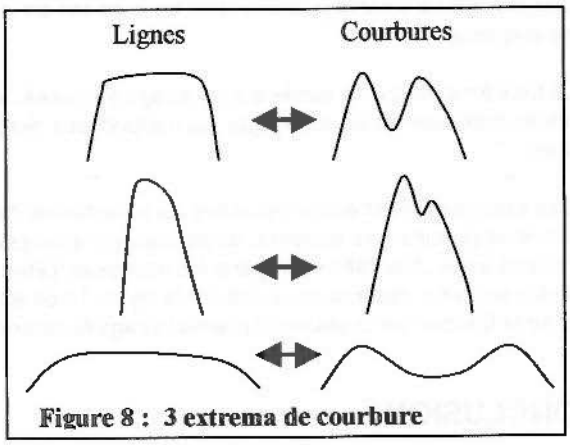


Figure 8 : 3 extrema de courbure

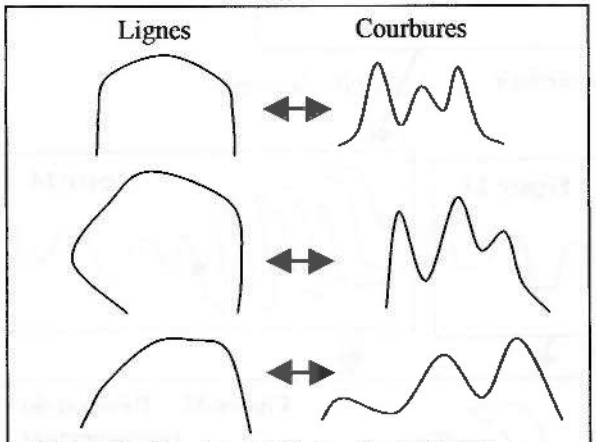


Figure 9 : 5 extrema de courbure et plus

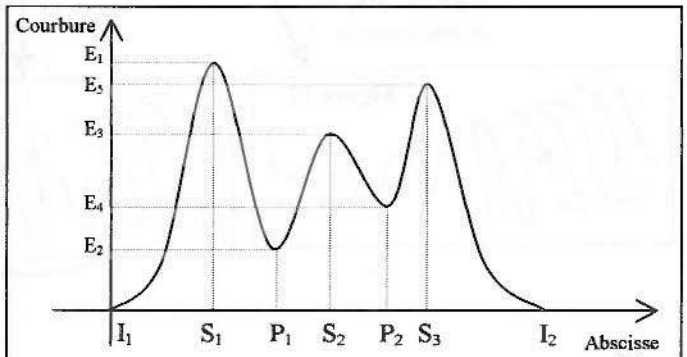


Figure 10 : Fonction de coubure d'un virage

En figure 9, le premier exemple se ramène à un virage pointu, le sommet du virage devant être placé au niveau du troisième extremum de courbure qui est le plus faible des trois maxima.

Le deuxième exemple ne se ramène facilement ni à un virage pointuni à un virage émoussé ; on a en fait un virage atypique.

Le troisième virage se ramène à un virage émoussé, le premier maximum étant à négliger par rapport aux deux autres.

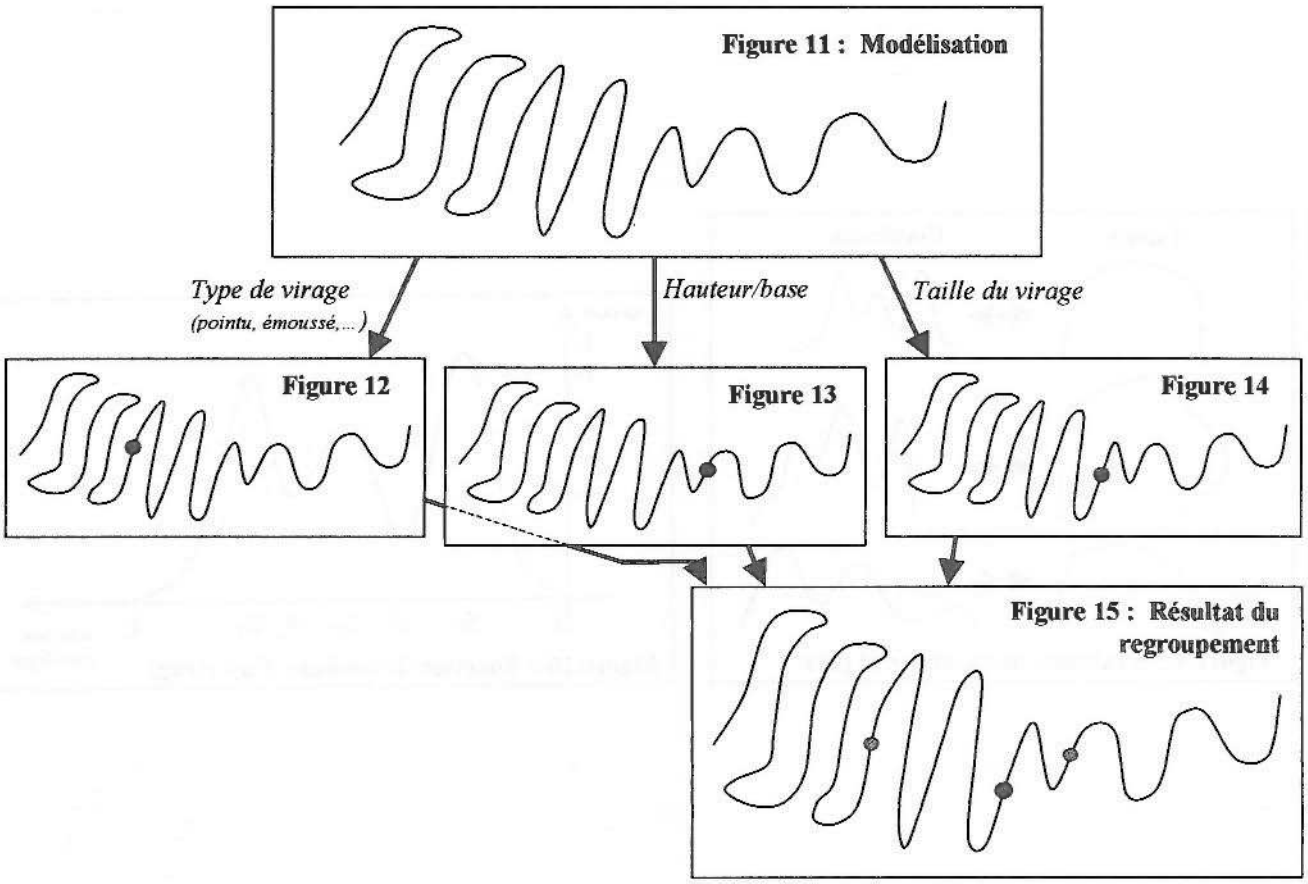
Ces exemples montrent la nécessité de caractériser de façon plus précise ces extrema, aussi bien en abscisse qu'en ordonnée. Il va falloir comparer les intensités, l'étendue des extrema, comme on le voit sur la figure 10 où est reprise la fonction de coubure du premier virage ci-contre.

CONCLUSION

Ce travail est loin d'être terminé: il nous reste en particulier à regrouper les virages pour former des *tronçons homogènes*.

Deux principaux problèmes interviennent pour réaliser cette tâche: tout d'abord, il faut définir des seuils, c'est-à-dire trouver la valeur limite du résultat d'une mesure donnée à partir de laquelle il faut considérer qu'on change de type de virage. Ensuite, il faut choisir les mesures dont on va se servir pour regrouper les virages entre eux; en particulier, elles devront être classées par ordre d'importance pour pouvoir décider si une série de virages doit ou non être considérée comme homogène (cette hiérarchisation est complexe et consistera sans doute en un système de règles dépendant de la configuration). En effet, chaque mesure va entraîner un découpage différent et il est vraisemblable qu'il y aura des inclusions mais aussi des chevauchements entre tronçons comme on le constate dans les figures 11 à 15 ci-dessous: nous avons une série de virage (Figure 11) que l'on découpe selon trois critères:

- Le *type* du virage en 12 (pointu, émoussé, chaussette, ...).
- La *taille* (hauteur) en 13.
- La *hauteur/base* en 14.



Si on met toutes les mesures au même niveau, rien ne permettra d'établir une hiérarchie entre tronçons. A partir de la modélisation de la figure 11 et en combinant trois mesures, nous obtenons quatre tronçons et, à moins de disposer de règles d'ordonnancement, nous sommes incapables de trouver le découpage donnant les deux tronçons les plus homogènes possible. Dans cet exemple, il apparaît que c'est le critère *hauteur/base* qui est primordial, suivi du *type* de virage. Nous obtenons donc la hiérarchie donnée dans la figure 15 (en gris clair figure le découpage secondaire).

Cet exemple montre le genre de problème auquel nous sommes actuellement confrontés : nous cherchons à établir des critères d'importance relative des mesures de forme ainsi que des autres types de mesures (orientation, taille, ...), lorsqu'on regroupe les virages en tronçons homogènes.

Notre travail doit donc être poursuivi jusqu'à l'obtention d'une palette d'outils et de mesures de forme suffisamment riche; il restera ensuite à mieux les *comprendre* (notamment savoir comment instancier les seuils et relier chaque concept (symétrie, sinuosité, ...) à un ensemble de mesures géométriques) et à appréhender leurs interactions, leur importance relative dans un contexte donné; une fois ce travail réalisé, les mesures en résultant seront intégrées dans un processus de généralisation basé sur des techniques d'apprentissage automatique (le but de cette technique d'apprentissage est de trouver pour chaque type de ligne la séquence d'algorithme de généralisation idéale, chaque ligne étant caractérisée par une série de mesures). Cette phase permettra alors de mieux définir les besoins: il conviendra d'améliorer les outils de caractérisation ou même éventuellement d'en créer d'autres. La phase suivante qui est la réalisation d'outils de comparaison entre ligne généralisée et ligne originale occasionnera certainement aussi des mises au point de notre travail.

Bibliographie

Barrault, M. (1998). Rapport de thèse, Université de Marne-la-Vallée/IGN, France.

Buttenfield, B. (1984). Line Structure in Graphic and Geographic Space. Rapport de thèse, Université de Washington, Etats-Unis.

Fritsch, E. (1999). Algorithmes de généralisation basés sur le lissage de la courbure. ACI, Ottawa, Canada.

McMaster, R.B. (1983). Mathematical measures for the evaluation of simplified lines on maps. Université du Kansas, Etats Unis.

Mustière, S. (1995). Mesures de la Qualité de la Généralisation du Linéaire. Université Paris I/ENSG, France.

Plazanet, C. (1996). Enrichissement des bases de données géographiques : analyse de la géométrie des objets linéaires pour la généralisation cartographique (application aux routes). Rapport de thèse, Université de Marne-la-Vallée IGN, France.

Ruas, A. et Plazanet, C. (1996). Strategies for automated generalization. 7th International Symposium on Spatial Data Handling, vol. 1, Delft, Pays-Bas.

Ruas, A. (1999). Modèle de généralisation de données géographiques à base de contraintes et d'autonomie. Rapport de thèse, Université de Marne-la-Vallée/IGN, France.