EXPLORATION VISUELLE DE TRAJECTOIRES DE GRANDS ANIMAUX

par Élodie Buard et Mickaël Brasebin
Institut géographique national – Laboratoire COGIT
73 avenue de Paris, 94165 Saint-Mandé Cedex France
mickael.brasebin@ign.fr
elodie.buard@ign.fr

1 Contexte et objectifs

Notre travail vise à analyser les interactions entre des populations animales et la dynamique de l'espace. D'un côté, les animaux se déplacent dans l'espace, en fonction de la disponibilité des ressources naturelles. Les animaux sont d'autant plus dépendants des ressources, qu'ils s'en nourrissent et qu'ils sont grands (Kleiber, 1975). Dans ce cadre, les grands herbivores -de plus de 10 kg- constituent des populations à étudier. Les ressources considérées sont sélectionnées en fonction de l'habitat des espèces animales. Or elles varient dans l'année, selon les saisons, et dans l'espace (Valeix et al., 2007), ce qui influence les présences d'animaux. D'un autre côté, quand les animaux se rassemblent dans des lieux spécifiques, comme les points d'eau, ils consomment les ressources qui se raréfient. En conséquence, ils influencent la dynamique de l'espace (Chamaillé-James et al., 2007). Une problématique est l'évaluation de l'impact sur les ressources, causé par des flux d'individus sur l'espace, que nous appelons pression exercée par les animaux. Le travail préliminaire est de comprendre les déplacements d'animaux. Pour cela, l'approche que nous adoptons est visuelle : les trajectoires sont dessinées, permettant de se rendre compte des déplacements et des habitats. Cette contribution a pour but de fournir des méthodes visuelles pour identifier les zones attractives, où des flux d'animaux convergent, et où les trajectoires se croisent. Ces lieux sont aussi ceux subissant une forte pression animale. De fait, la pression est due à plusieurs facteurs : l'activité réalisée sur le lieu, comme manger, boire ou se reposer, le nombre d'animaux, la taille de l'espèce ou même la fréquence de retour aux mêmes lieux.

Les données utilisées pour appréhender les déplacements d'herbivores résultent des positions successives enregistrées par des GPS à intervalle de temps fixe. À partir de ces points, nous construisons les trajectoires des animaux par une interpolation linéaire. Nous définissons une trajectoire comme l'« ensemble des positions et déplacements concrets qu'effectue un individu dans l'espace-temps » (Chardonnel, 2001). La *Time-Geography* (Hägerstrand, 1970 ; Lenntorp, 1978 ; Langran, 1988) a apporté un cadre pour modéliser les déplacements par l'analyse des activités quotidiennes des individus. Les modèles issus de la *Time Geography* décrivent les trajectoires possibles d'un individu en fonction de ses activités et de son environnement (Peuquet, 1994). Pour caractériser un lieu où les individus s'arrêtent pendant un certain temps pour une activité, Hägerstrand (1970) utilise la notion de station. La figure 1 est un exemple de chemin spatio-temporel pris par un individu, qui forme la trajectoire. Ce chemin lie trois stations, représentées par des points dans l'espace et pendant lesquelles l'individu ne bouge pas (et donc les lignes sont verticales). Ainsi plus la ligne est verticale, moins l'individu se déplace rapidement. Nous utilisons par la suite le terme de station pour décrire les lieux d'arrêts des herbivores. Une problématique est de connaître leurs activités dans les stations.

Les grands herbivores que nous étudions sont ceux du parc national de Hwange au Zimbabwe, en particulier les éléphants, les buffles et les zèbres, dont la localisation est présentée en figure 2. Comme ces animaux vivent et se déplacent dans les mêmes groupes, seul un représentant du groupe porte un collier GPS (cela permet également de diminuer les coûts dus à l'achat et à la pose de collier). Pour étudier les trajectoires de groupes d'herbivores, nous cherchons à visualiser les chemins spatio-temporels pris par les groupes d'herbivores, comme Hägerstrand (1970). D'autres approches ont été développées dans le domaine de la géovisualisation pour analyser les trajectoires dans un espace 3D (MacEachren et Kraak, 2001 ; Kraak, 2006 ; Kraak, 2003 ; Li, 2010a). Le plus souvent, le temps est converti en coordonnées Z, selon des règles de conversion entre l'espace et le temps (Li, 2010b). Par exemple, on peut considérer que 10 heures correspondent à une distance d'un mètre en Z. De cette façon, les trajectoires de chaque groupe peuvent être visualisées, comme en figure 3.

Cette figure, qui ne comprend que les trajectoires de deux groupes, est peu lisible: les mouvements semblent aléatoires. Ceci est dû à la manière de se déplacer des grands herbivores. Ils sont en effet

capables de se déplacer sur de grandes distances, d'une centaine de kilomètres, mais aussi sur de petites, de quelques mètres (Baker,1978). À titre d'exemple, au sein même des migrations, les grands herbivores effectuent des déplacements journaliers de faible distance (Nathan, 2008). Cette multi scalarité rend complexe la lecture des trajectoires : non seulement les petits déplacements cassent la régularité des grands mouvements mais aussi les lieux de convergence ne sont pas perçus. Par conséquence, nous pensons que la représentation 3D des déplacements est adaptée aux déplacements répétitifs et localisés dans des lieux précis et spécifiques, comme des hommes qui se déplacent de leur maison à leur bureau, mais pas pour des déplacements variables en fréquence et en lieux. Par ailleurs, la notion d'arrêt pour un animal n'est pas une absence de déplacement, de façon stricte, parce qu'il se déplace par petits déplacements, et que ses périodes de sommeil, par exemple, sont courtes. Ces arrêts ne sont pas non plus contraints par des objets limités dans l'espace, comme le sont certaines pièces des maisons pour les hommes. Nous définissons alors un arrêt comme une période de temps pendant laquelle des groupes d'herbivores font de petits déplacements dans une petite zone, tout en restant sous un seuil de vitesse. Ces arrêts sont fréquentés pour consommer des ressources. Travailler sur ces entités présente l'intérêt d'évaluer les besoins et les fréquences d'accès en ressources des herbivores.

Dans le but d'améliorer la visualisation des trajectoires d'herbivores, nous proposons de segmenter les trajectoires en déplacements et arrêts (section 2). Cette étape permet d'identifier les activités dans les stations et le nombre de trajectoires qui passent par les mêmes stations. Ensuite, nous décrivons un outil de visualisation en 3D pour aider à la compréhension des trajectoires, en particulier pour mettre en évidence les récurrences temporelles des déplacements (section 3). Les deux outils ont été implémentés sous GeOxygène, la plateforme open source de développement en SIG, conçus par le laboratoire COGIT de l'IGN (Badard et al., 2003 ; Bucher et al., 2009). La section 4 est une discussion. La dernière section présente une conclusion et des perspectives.

2 Identification des zones attractives et des activités dans les trajectoires de troupeaux d'animaux

Dans cette partie, nous décrivons le premier outil qui extrait les zones attractives, où les animaux convergent, puis identifie leurs activités dans ces même zones, à partir des concepts de la *Time-Geography* (Peuquet, 1994 ; Langran,1988). Les zones attractives ont une double importance parce que (1) la présence d'animaux témoigne de la qualité et quantité des ressources et (2) ces mêmes ressources ont une forte probabilité d'être endommagées par suite de la pression exercée par les animaux. Nous distinguons trois types de zones attractives, selon différentes notions de convergence et de type de pression : une zone de stations, un couloir et un carrefour. Premièrement, une station est une zone d'arrêt, ou de petits déplacements, fréquentée pour une certaine activité. L'étendue de la station varie selon le temps d'arrêt. Une même station peut être empruntée par plusieurs groupes. Dans ce cas, il s'agit d'une zone de stations. Deuxièmement, un couloir est une zone allongée sur laquelle plusieurs trajectoires passent. Les déplacements se font alors parfois au sein de couloirs. Enfin, un carrefour est une zone de croisement de plusieurs trajectoires. L'extraction automatique se déroule selon trois étapes : l'identification des stations puis des zones attractives et enfin, après quelques calculs, les activités qui sont allouées à ces zones.

La première étape consiste à segmenter les trajectoires : quand un groupe bouge effectivement, c'est un déplacement ; quand un groupe a une vitesse pratiquement nulle, il est à l'arrêt. Dans ce cas, l'arrêt se déroule sur une station. Le seuil de vitesse maximal permet d'identifier les stations. Il dépend des espèces considérées et de leur capacité physique de déplacement. Dans une première approche, nous avons fixé un seuil de 100m/h. Au-delà, le groupe est en déplacement ; en dessous, il est dans une station. Plusieurs heures peuvent être passées dans les stations, à condition que les vitesses calculées pour chaque heure soient inférieures au seuil. La figure 4 illustre différentes durées d'arrêts, qui mettent en évidence des étendues variables de stations. Plus la durée est grande, plus la station est étendue.

Une fois que les stations ont été identifiées, nous analysons la convergence de plusieurs trajectoires. Les zones attractives sont des lieux de convergence et/ou de retour des groupes. Pour identifier de telles zones, nous nous appuyons sur la forme des trajectoires (en particulier si la trajectoire est cyclique, elle revient sur les mêmes lieux à une certaine fréquence) et sur le nombre de trajectoires arrivant sur une portion d'espace. Nous construisons différents types de zones attractives : des zones de stations, des couloirs et des carrefours. Les zones de stations sont des lieux où les stations, identifiées par segmentation des trajectoires, sont denses. Les couloirs correspondent à des déplacements proches dans une ou plusieurs trajectoires.

Ils sont construits par intersection des zones tampons autour des déplacements. La largeur de la zone tampon est un paramètre de cette méthode. Après expérimentation, nous avons fixé cette largeur à 100m. Enfin, les carrefours sont des lieux de croisements de trajectoires. Des exemples de ces zones attractives sont présentés en figure 5.

Dans une troisième et dernière étape, les activités dans les zones peuvent être analysées. Les couloirs et les carrefours correspondent à une activité de déplacement – marche ou course – tandis que les zones de stations servent à des activités statiques, dans lesquelles nous considérons les trois activités suivantes : se nourrir, boire et se reposer. Ces activités engendrent des pressions sur les ressources de natures différentes : un piétinement pour les déplacements et le repos ; un prélèvement de ressources pour se nourrir et boire. La méthode d'identification des activités repose sur la durée des stations dans chaque trajectoire. Assigner des activités à des durées peut différer selon les espèces considérées. Buard (2011) a montré que les durées de 3 heures d'arrêt étaient privilégiées pour se reposer, tandis que pour une durée d'une et de deux heures les herbivores se nourrissent ou boivent. Distinguer ces deux dernières activités repose sur la proximité d'un point d'eau. À noter que plus de trois heures de pause correspond de nouveau à une activité d'alimentation. La figure 6 illustre les stations de deux et quatre heures pour un groupe de buffles. Cette représentation permet de mieux percevoir les activités similaires au sein d'une même trajectoire. Nous remarquons aussi sur cette figure que les courts arrêts sont plus nombreux que les longs. Jolivet et al. (2011) utilisent ces stations pour les corréler avec d'autres éléments de l'espace, routes ou bâtiments.

Pour résumer cette partie, nous avons présenté une méthode qui traite de grandes bases de données et extrait des zones attractives et les activités accomplies dans ces lieux à partir de plusieurs trajectoires. Néanmoins, nous n'avons pas accès à la récurrence temporelle des trajectoires dans les zones, au cas où le groupe d'herbivores revient plusieurs fois aux mêmes lieux. C'est la raison pour laquelle nous utilisons une représentation en 3D avec le temps en coordonnées verticales, présentée dans la partie suivante.

3 Représentation en 3D des trajectoires de troupeaux d'animaux

Pour visualiser nos données en 3D, nous utilisons GeOxygene 3D (Brasebin, 2009), une plateforme du laboratoire COGIT. Elle a été utilisée pour résoudre les problèmes de lisibilité pour représenter les trajectoires d'animaux en 3D, tels que présentés en figure 2, à cause de leurs petits déplacements.

3.1 Ajout des zones d'intérêt dans les trajectoires

Tout d'abord, nous voulons faciliter l'analyse visuelle en organisant les petits et grands déplacements. L'application 3D d'Andrienko et al. (2003) hiérarchise également les déplacements d'animaux en généralisant les rythmes des trajectoires. Ensuite, nous ajoutons des informations d'intérêt qui dépendent de la problématique. Dans le cas de déplacements de grands animaux, nous voulons identifier les lieux que les animaux fréquentent de manière privilégiée, les zones attractives, et décrire la pression sur ces lieux. Les informations à visualiser sont donc la localisation des zones attractives - stations et couloirs -, la durée des stations qui renseigne sur les activités accomplies, la période de temps et la présence de certains types de végétaux et d'eau. Cette dernière information renseigne également sur le type d'activité réalisée.

3.2 Les arrêts en 3D

La première étape consiste à représenter les stations dans la vue 3D. Les stations sont non seulement des zones d'intérêt, mais aussi comme elles définissent les petits déplacements, elles permettent de mieux hiérarchiser la multi scalarité des déplacements. Grâce à la première étape, en 2D, la localisation, la durée et l'étendue des arrêts dans les trajectoires sont connues. En 3D, les pauses sont des stations dans l'espace (X, Y) ayant une durée sur Z. Nous adoptons une forme circulaire de station (et non carrée), comme en 2D sur les figures précédentes, ce qui permet de considérer un point central autour duquel les groupes rayonnent en petits déplacements. En 3D, la pause est donc un cylindre, centré sur sa localisation dans l'espace. Le rayon de ce cylindre modifie ses propriétés spatiales et correspond à l'étendue de la station. Plus le cylindre est fin, moins le groupe d'herbivores se déplace au sein de la station. Le rayon induit une notion de compacité. La hauteur du cylindre est une propriété temporelle : la durée de l'arrêt. Pour accentuer cette propriété de la pause, qui permet de détecter les différentes activités, nous avons choisi de remplir le cylindre par une couleur en fonction de sa durée, et de ce fait, de masquer les petits déplacements à l'intérieur de la station. Les couleurs sont choisies parmi un dégradé de couleurs, qui est paramétrable. Dans notre exemple, en figure 7, qui zoome sur une partie de la trajectoire d'un groupe de zèbres, la couleur blanche

fait ainsi référence à une courte pause d'une heure, le jaune à deux heures d'arrêt, l'orange à trois heures et enfin le rouge à quatre heures d'arrêt et plus. Par ailleurs, pour différencier les stations de plusieurs groupes d'animaux, nous appliquons une couleur de bordure à la station, qui est en cohérence avec la couleur du trait de la trajectoire. Cette différenciation s'explique également par la perspective, comme les objets éloignés apparaissent plus petits que les objets proches, la seule hauteur ne permet pas de comparer la durée de deux pauses situées à des endroits différents de l'espace.

Une deuxième information importante dans les stations, pour distinguer l'action de boire ou de se nourrir, concerne l'environnement immédiat. Nous voulons en particulier savoir quelle hauteur de végétation est présente dans les stations et s'il existe un point d'eau ou non. Pour visualiser ces informations, nous ajoutons des petits cubes au dessus des cylindres. Ils comportent des icônes représentant une goutte d'eau si un point d'eau est présent et un arbre (un acacia), un buisson ou de l'herbe si cette végétation existe. Sur la figure 7, les trois stations sont réalisées près de forêts et l'une se situe près d'un point d'eau. De façon générale, l'activité de boire se situe à proximité d'un point d'eau tandis que les deux autres types d'activités (se nourrir et se reposer) sont plus difficilement discernables. Une hypothèse est que quand la station est fine – quand le cylindre est peu large -, les petits déplacements sont peu nombreux et l'activité est probablement de se reposer. De cette façon, la station de couleur rouge (fig. 7) est large et sert plutôt à se nourrir : les animaux se déplacent autour d'un point pour chercher de la nourriture. Au contraire, la station jaune, plus fine serait un lieu de repos. Cette analyse d'affectation des activités est un travail en cours, réalisé en collaboration avec les experts.

Ces propositions de représentation des pauses en 3D en faisant varier les volumes des cylindres peuvent cependant altérer la perspective : un petit cylindre paraît plus grand s'il est localisé devant. Une aide est apportée pour cela par les cubes placés au-dessus des cylindres.

Enfin, nous représentons ponctuellement les couloirs de passage : si la trajectoire passe dans un couloir, identifié par la méthode d'extraction de zones attractives (partie 2), il est mis en évidence par une zone de couleur rose. Un couloir est présent en figure 7.

3.3 Visualiser les périodes de temps

Une troisième information à représenter est la ou les périodes de temps sur lesquelles se déroulent les trajectoires, selon des intervalles de temps prédéfinis. Cette information permet d'avoir accès au contexte temporel de déplacement. Le premier intervalle temporel d'intérêt est la saison, comme les ressources varient beaucoup entre deux saisons, ce qui peut affecter les comportements et les trajectoires de groupes d'herbivores. Les deux saisons (sèche et des pluies) qui existent dans notre application doivent être différenciées visuellement. Ces deux saisons, concernent une grande période (environ 6 mois), et englobent donc une grande proportion des trajectoires. Pour ne pas gêner la visualisation des zones d'intérêt (comme les stations) qui ont lieu dans une saison particulière, nous choisissons de colorier le fond de l'espace 3D en fonction de certaines couleurs : bleu pour la saison des pluies et orange pour la saison sèche. Le découpage temporel entre les deux saisons est fixé par une date à partir de laquelle il commence à pleuvoir. La figure 8 montre l'ensemble des déplacements d'un groupe de zèbres au cours de l'année, à travers les deux saisons. Ce groupe est un peu plus mobile pendant la saison des pluies. Notons que la figure précédente, qui présente des cylindres, correspond à un zoom sur la saison des pluies puisque le fond est bleu.

Ces périodes de temps sont paramétrables : le seuil temporel, le nombre de périodes et les couleurs peuvent être modifiés. Nous avons ainsi testé un autre intervalle de temps : 12 heures. Cet intervalle, qui distingue le jour et la nuit, est a priori intéressant puisqu'il est biologique et devrait révéler des rythmes de déplacements différents. Les couleurs choisies sont le jaune pour le jour et le bleu foncé pour la nuit. Elles figurent en arrière-plan comme précédemment pour les saisons. La figure 9 présente un exemple de trajectoire, visualisée selon ce seuil temporel. Les pauses sont en général réalisées de jour, au début ou à la fin de la journée. Notons que cette représentation n'est pas optimale parce que les cylindres sont représentés dans l'espace 3D, avec une certaine hauteur et une certaine profondeur, tandis que les périodes de temps 'tapissent' le cube spatio-temporel. En conséquence, les cylindres apparaissent plus gros et les pauses semblent durer toute la journée, alors qu'elles ne s'étendent que sur quelques heures. Il faudrait adapter la durée des pauses en fonction de leur position dans l'espace 3D.

Ainsi, ces représentations temporelles sont utiles pour des grands intervalles temporels (comme la saison) et permettent une analyse temporelle des déplacements. Néanmoins, quand les intervalles temporels sont courts (comme la journée), l'analyse est moins précise en raison de la localisation et de la taille des cylindres.

4 Discussion

4.1 Intérêt de la détection automatique des activités

Détecter les lieux d'activités à partir de différentes trajectoires permet une analyse spatiale des déplacements, à différentes échelles temporelles et spatiales. Pour affiner l'analyse des zones attractives, les trajectoires peuvent être agrégées selon différents critères :

- Les périodes de temps (par exemple : la saison, la semaine ou le jour) pour identifier quand les lieux sont fréquentés.

- L'étendue des déplacements permettant de rejoindre les zones pour distinguer les attractions locales et globales.

- La diversité d'espèces pour savoir si les lieux sont spécifiques à une espèce ou au contraire communs à plusieurs.

En outre, nous ajoutons des informations quantitatives aux zones attractives pour définir la pression exercée par les animaux qu'elles subissent. La pression sur les lieux est fonction de l'intensité de fréquentation (c'est-à-dire combien d'animaux sont présents) et la récurrence de passage. L'intensité de fréquentation est calculée sur chaque zone attractive identifiée grâce au nombre total de trajectoires présentes, correspondant chacune à un certain nombre d'animaux. Cette information permet de rendre compte de la pression sur ces zones attractives. La figure 10 montre des zones attractives, d'intensités différentes, hiérarchisées de 1 pour la plus grande valeur à 5, en fonction du nombre de trajectoires localisées dans les zones. Notons que la visualisation en 2D permet de repérer directement les superpositions des trajectoires et donc les différentes intensités. Cependant, les récurrences temporelles ne sont pas visibles.

4.2 Intérêt de la visualisation en 3D pour analyser les déplacements

4.2.1 Motifs temporels

Une autre façon d'exercer de la pression sur une zone attractive est d'y revenir de façon récurrente. La visualisation en 2D n'est pas idéale pour visualiser directement le temps. En revanche, en 3D, une analyse visuelle des récurrences temporelles peut être faite. Par exemple, la figure 11 montre une trajectoire qui effectue des allers retours entre deux zones attractives, des zones de stations notées A et B, durant la saison des pluies (la couleur du fond étant bleu). D'après les différentes icônes, A comprend des buissons, tandis que B est une zone d'eau et de forêt. De plus, 7 pauses sont situées dans A, 5 dans B, dans cet intervalle de temps. Nous identifions les zones attractives en représentant la proximité des pauses successives, que nous appelons connexion spatiale, par un trait rouge. Plus ce trait est grand, plus l'intervalle de temps entre les pauses est grand et les stations moins fréquentes. Les allers retours de la même trajectoire ne sont pas visibles en 2D, sur la figure 12. La visualisation 3D permet donc de compter la fréquence des déplacements et de percevoir la durée des stations, et la vitesse des déplacements.

Ces deux figures montrent que la visualisation 3D est appropriée pour l'analyse temporelle. Cependant, la 2D permet de mieux détecter les agrégations – et donc les zones attractives. Une autre comparaison possible entre les deux visualisations est que la 3D fournit des informations contextuelles de manière discrète, seulement sur les stations grâce aux cubes. Dans les déplacements, cette information est perdue. Au contraire, en 2D, cette représentation est continue. Nous pensons donc que l'association des deux visualisations 2D-3D est nécessaire pour une bonne compréhension des propriétés spatiales et temporelles des trajectoires.

4.2.2 Interactions entre différentes trajectoires

À travers nos expérimentations, nous avons découvert que la vue 3D permet également de repérer les interactions spatiales entre des trajectoires, c'est-à-dire la présence simultanée de groupes d'herbivores. Plusieurs causes d'interactions sont possibles, par exemple un groupe qui évite l'autre (comme pour des proies face à des prédateurs ou des groupes plus agressifs que d'autres) ou deux groupes qui peuvent cohabiter. La figure 13 présente un extrait de scène comportant deux groupes de zèbres, ayant des trajectoires et des pauses de couleur noire et verte. Les pauses des deux groupes sont situées au même endroit et pratiquées aux mêmes moments. Il y a trois zones de stations communes, où il existe une interaction entre les groupes. Sur la première zone, en bas, la pause du groupe vert est réalisée en premier, sur une durée de 5 heures, puis le groupe noir arrive pour une pause plus courte. Le groupe vert part avant le noir. La deuxième zone, au milieu, est fréquentée d'abord par le groupe noir, sur trois heures, tandis que le groupe vert arrive ensuite pour seulement une heure. Entre ces deux zones de stations, les groupes empruntent le même chemin, mais ils sont masqués par un des cylindres. Enfin, la dernière zone de station est fréquentée en même temps par les deux groupes, mais la pause du groupe vert est masquée par celle du noir, en raison de sa faible étendue.

La figure 13 illustre deux trajectoires qui interagissent. Les stations sont identifiées pour chaque trajectoire. Néanmoins, elles sont pratiquées de la même façon. Pour faciliter la lecture, une solution serait d'améliorer la superposition des stations et d'agréger les icônes indiquant la végétation. Dans ce cas, il n'y aurait qu'une icône pour une zone de station.

5 Conclusion et perspectives

Dans ce papier, nous explorons les trajectoires de grands animaux, qui effectuent à la fois des grands et petits déplacements. Pour comprendre les déplacements, nous connectons l'environnement aux caractéristiques des trajectoires. Le premier outil détecte automatiquement les zones attractives, en particulier les stations et les couloirs, en fonction de paramètres de distance (partie 2). Le second outil utilise les résultats précédents et les intègre dans une visualisation en 3D : les stations sont représentées par des cylindres et les couloirs par des lignes de couleur rouge (partie 3). Cet outil est particulièrement utile pour repérer les interactions (1) entre une trajectoire et le contexte de déplacement et (2) entre deux trajectoires (partie 4).

Comme nous l'avons dit précédemment, la vue 3D présente l'avantage de suivre une trajectoire – ou un petit nombre – dans le temps, de détecter visuellement de façon rapide les récurrences spatio-temporelles, les interactions, et mêmes les trous dans les données. Le principal problème dans ce genre de visualisation est le manque d'habitude des utilisateurs pour naviguer dans l'espace 3D. Quant à la vue en 2D, elle permet de détecter les zones attractives et leur intensité de fréquentation. Nous pensons que les deux types de visualisation sont complémentaires et qu'ils mettent en évidence des propriétés différentes de trajectoires.

D'autres concepts restent à visualiser en 3D, comme les carrefours ou la centralité de certains lieux. Concernant les interactions entre plusieurs trajectoires, différents cas de présences mutuelles nécessitent d'être explorés, dans les stations et les déplacements, par exemple des évitements ou des poursuites.

Enfin, un travail important concerne l'impact réel de la pression exercée par les herbivores sur la végétation et l'eau. Dans les zones attractives soumises à une forte pression animale, la végétation devrait être modifiée (Boulanger, 2010) parce que les herbivores, en nombre, consomment des végétaux dans les stations et les piétinent dans les couloirs (Loucougaray, 2003). Ce travail est en cours.

Bibliographie

Andrienko N., Andrienko G., Gatalsky P., 2003, “Exploratory spatio-temporal visualization: an analytical review”, *Journal of Visual Languages and Computing*, n° 14(6), p. 503-541.

Badard T., Braun A., 2003, “OXYGENE: An open framework for the deployment of geographic web services”, dans *Proceedings of the 21st International Cartographic Conference (ACI/ICA)*, Durban, South Africa, p. 994-1004.

Baker RR, 1978, *The Evolutionnary Ecology of Animal Migration*, London, Hodder and Stoughton,.

Boulanger V., 2010, “Pression d’herbivorie et évolution des communautés végétales : influence à court et moyen termes des populations de cervidés sur la diversité végétale en milieu forestier ”, Université de Nancy, École doctorale RP2E, thèse soutenue le 27 avril.

Brasebin M., 2009, “GeOxygene: An Open 3D Framework for the Development of Geographic Applications”, *12th International Conference on Geographic Information Science (AGILE’09*), 2-5 June, Hanovre (Germany).

Buard E., 2011, “Pratiques spatiales des populations animales : analyses par les trajectoires”, *Dixièmes Rencontres de Théo Quant*, Besançon, 23-25 février.

Bucher B., Brasebin M., Buard E., Grosso E., Mustière S., 2009, “GeOxygene: built on top of the expertness of the French NMA to host and share advanced GI Science research results”, *Proceedings of International Opensource Geospatial Research Symposium 2009* (OGRS’09), 8-10 July, Nantes (France).

Chamaillé-James S., Fritz H., Murindagomo F., 2007, “Climate-driven fluctuations in surface-water availability and the buffering role of artificial pumping in an African savanna: Potential implication for herbivore dynamics”, *Austral Ecology* 32, n°. 7, p. 740–748.

Chardonnel S., 2001, “La *time-geography* : les individus dans le temps et dans l’espace ”, dans *Modèles en analyse spatiale*, sous la direction de Léna Sanders, Chapitre 4, Traité IGAT, Éditions Hermès, p. 129-156.

Hägerstrand T., 1985, “Time-Geography : focus on the corporeality of man, society and environment”, dans *The Science of Praxis of Complexity*, The United Nations University, p. 193-216.

Hägerstrand T., 1970, “What about people in regional science?”, *Papers of the Regional Science Association*, 24, p. 1-12.

Jolivet L., Cohen M., Ruas A., 2011, “Characterizing geographical space to analyze fauna movement”, ICC’11, July, Paris, France.

Kleiber M., 1975, *The fire of life: an introduction to animal energetics*, New York, Krieger.

Kraak M.J, 2003, “The space-time cube revisited from a geovisualization perspective”, dans *Proceedings of the 21st International Cartographic Conference (ICC)*, p. 1988-1996.

Kraak M.J, 2006, “Playing with maps Explore, discover, learn, categorize, model, analyse, explain, present geographic and non-geographic data”, *IV*, p. 291-296.

Kwan M.P., Lee J., 2003, ”Geovisualization of Human Activity Patterns Using 3D GIS: A Time-Geographic Approach”, dans *Spatially Integrated Social Science*.

Langran G., 1988, “A Framework for Temporal Geographic Information”, *Cartographica*, vol. 25, n°3, p. 1-14.

Lenntorp B, 1978, “A time geographic simulation model of individual activity programmes”, dans T. Carlstein, D.N. Parkes, and N.J. Thrift (ed.), *Human Activity and Time Geography*, London, Edward Arnold, p. 162-180.

Li X., Çöltekin A., Kraak M.-J., 2010, “Visual Exploration of Eye Movement Data Using the Space-Time-Cube”, *GIScience,* 295-309- a.

Li X., Kraak M.-J., 2010, “A temporal visualization concept: A new theoretical analytical approach for the visualization of multivariable spatio-temporal data”, *Geoinformatics,* 1-6- b.

Loucougaray G., 2003, “Régimes de pâturage et hétérogénéité de la structure et du fonctionnement de la végétation prairiale (marais poitevin) ”, décembre.

MacEachren A.M, Kraak M.J., 2001, “Research challenges in Geovisualization”, *Cartography and Geographic Information Systems*, n°1, p. 3-12.

Nathan R., 2008, “A movement ecology paradigm for unifying organismal movement research”, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105, n°. 49.

Peuquet D.J., 1994, “It’s about time: A conceptual framework for the representation of temporal dynamics in geographic information systems”, *Annals of the Association of the American Geographers*, vol. 84, n°3, p. 441-461.

Valeix M., Chamaillé-Jammes S., Fritz H., 2007, “Interference competition and temporal niche shifts: elephants and herbivore communities at waterholes”, *Oecologia* 153, n° 3 (6), p. 739-748.

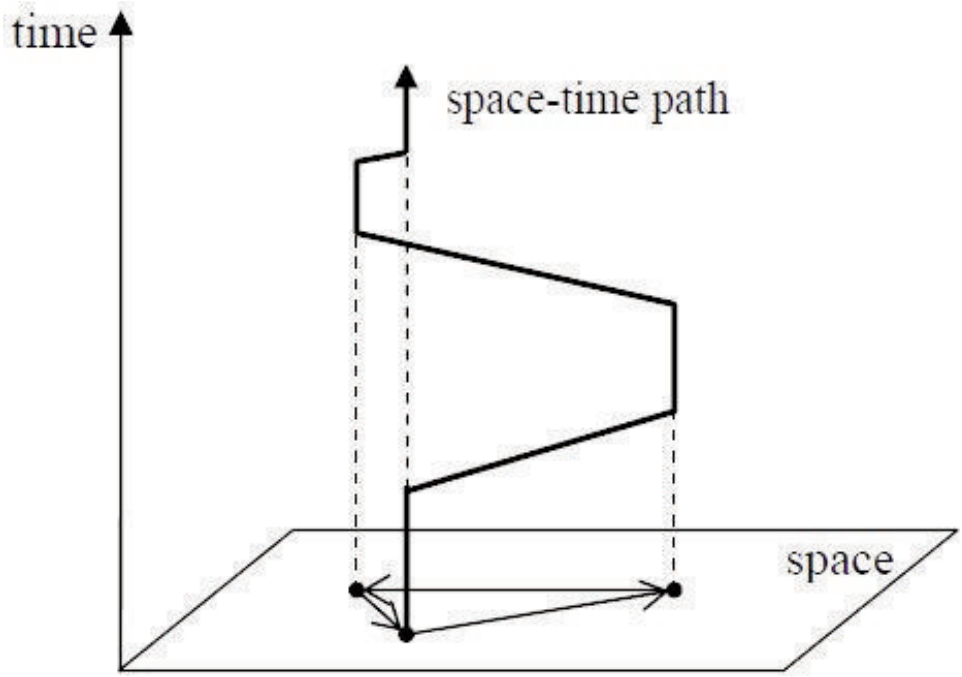

Figure 1 : Un chemin spatio-temporel, d'après (Hägerstrand 1970)

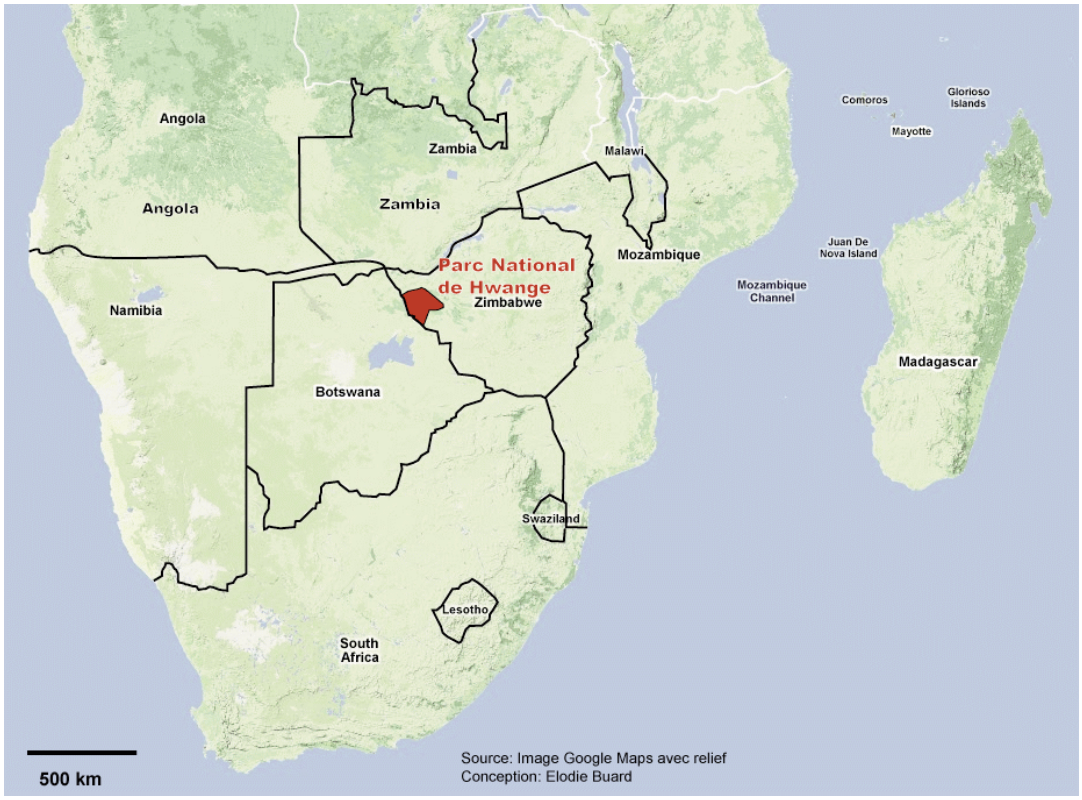

Figure 2 : Situation du parc national de Hwange

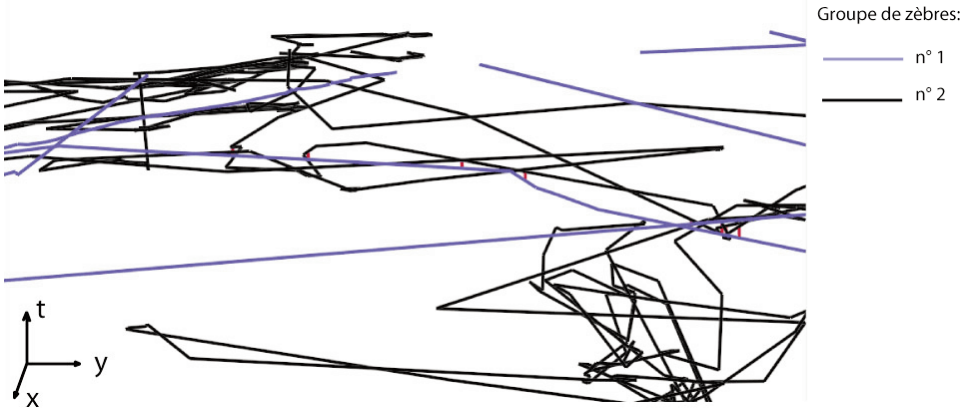

Figure 3 : Deux chemins spatio-temporels de deux groupes de zèbres

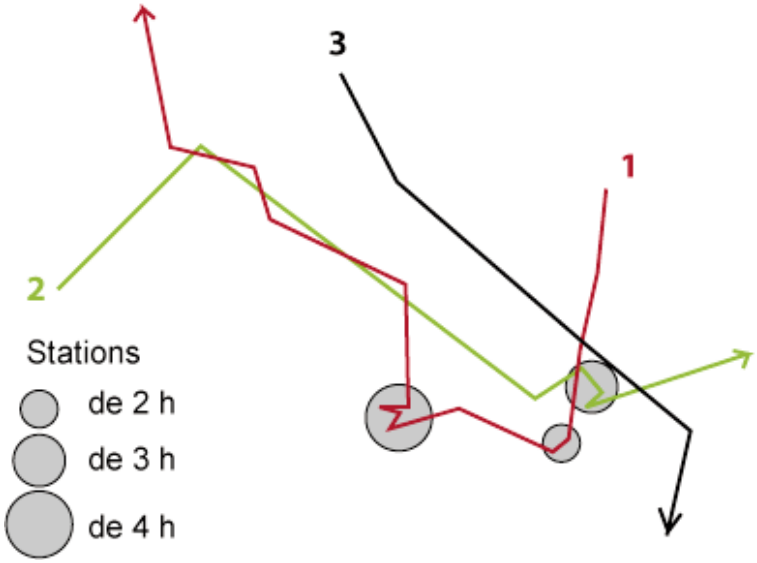

Figure 4 : Identification des stations de différentes durées de trois trajectoires.

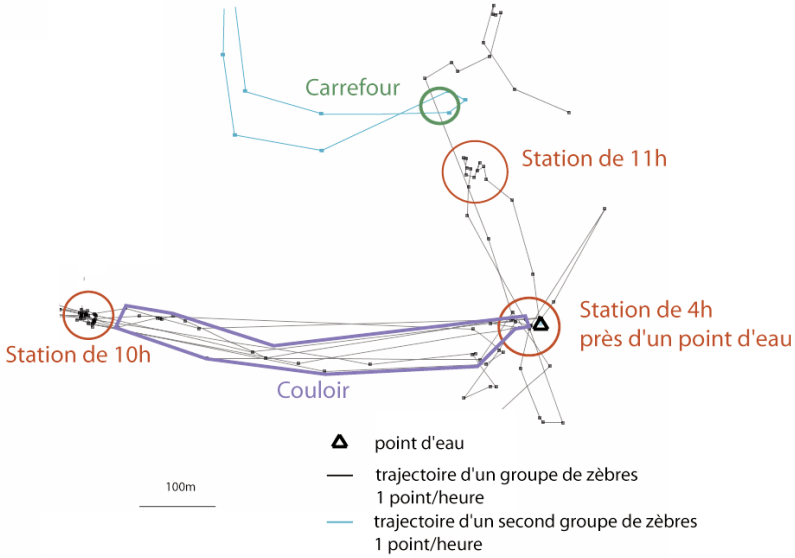

Figure 5 : Extraction des zones attractives à partir de deux trajectoires (la bleue et la noire).

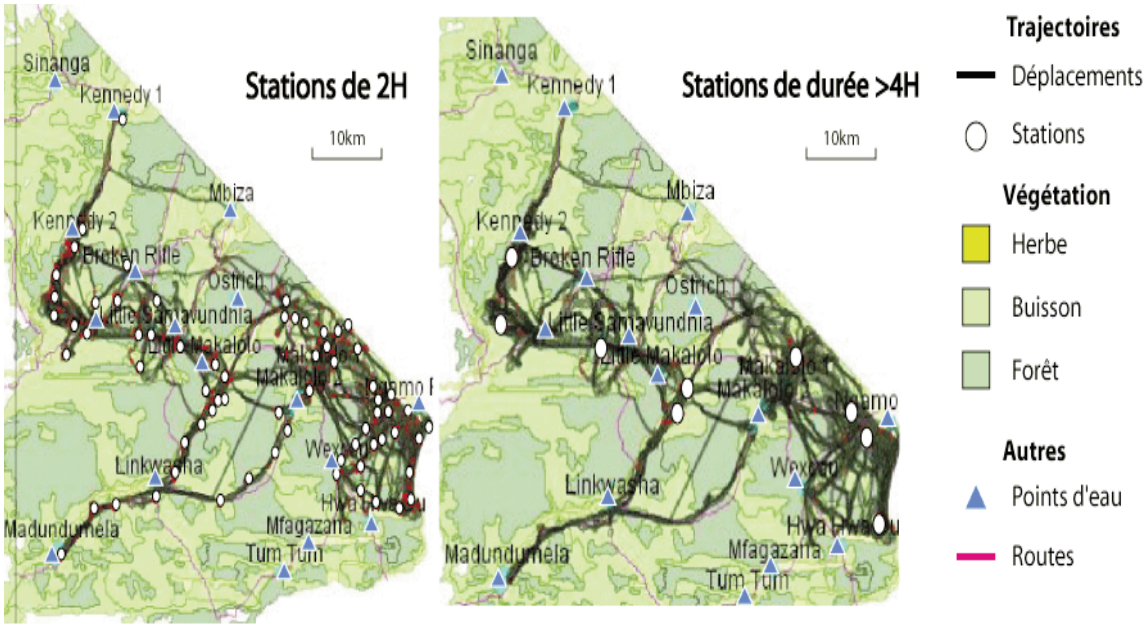

Figure 6 : Répartitions spatiales de stations de différentes durées

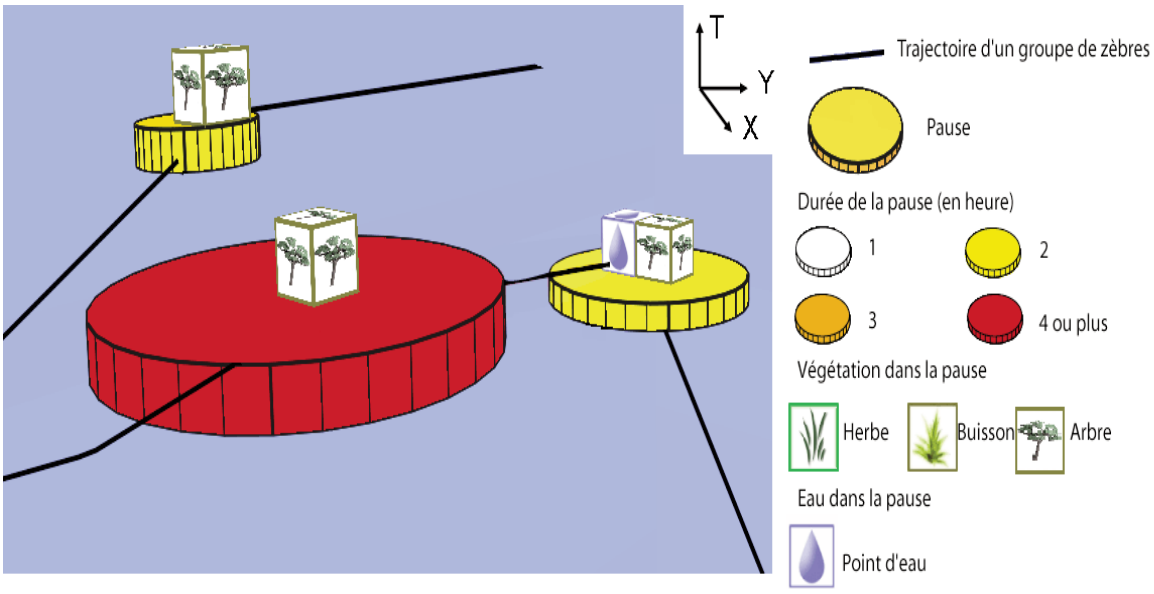

Figure 7 : Zoom sur une partie de la trajectoire d'un groupe de zèbres, comportant des stations

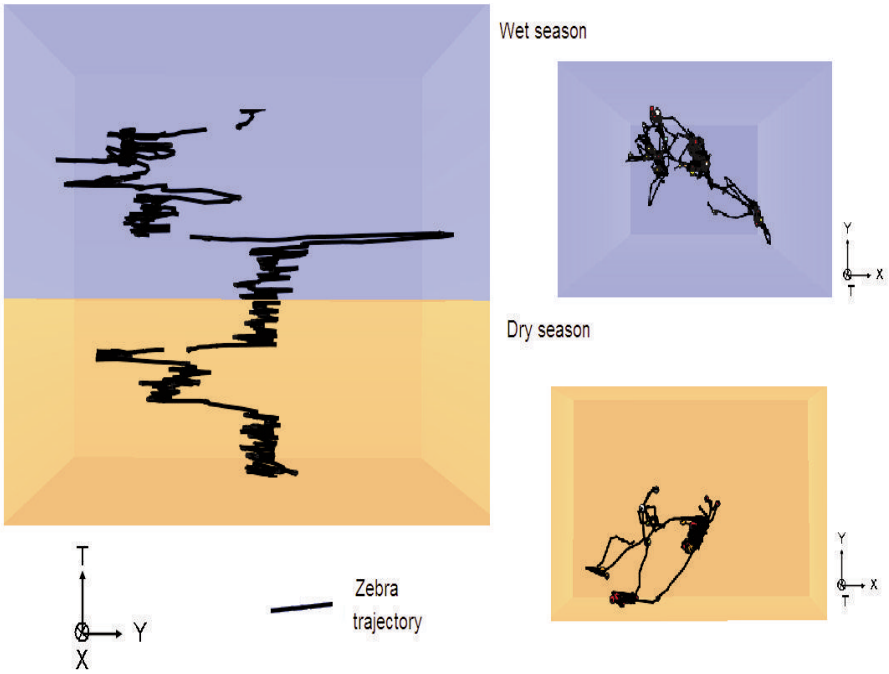

Figure 8 : Vue globale d'une trajectoire d'un groupe de zèbres sur deux saisons (à droite : les vues de dessus et de dessous du cube)

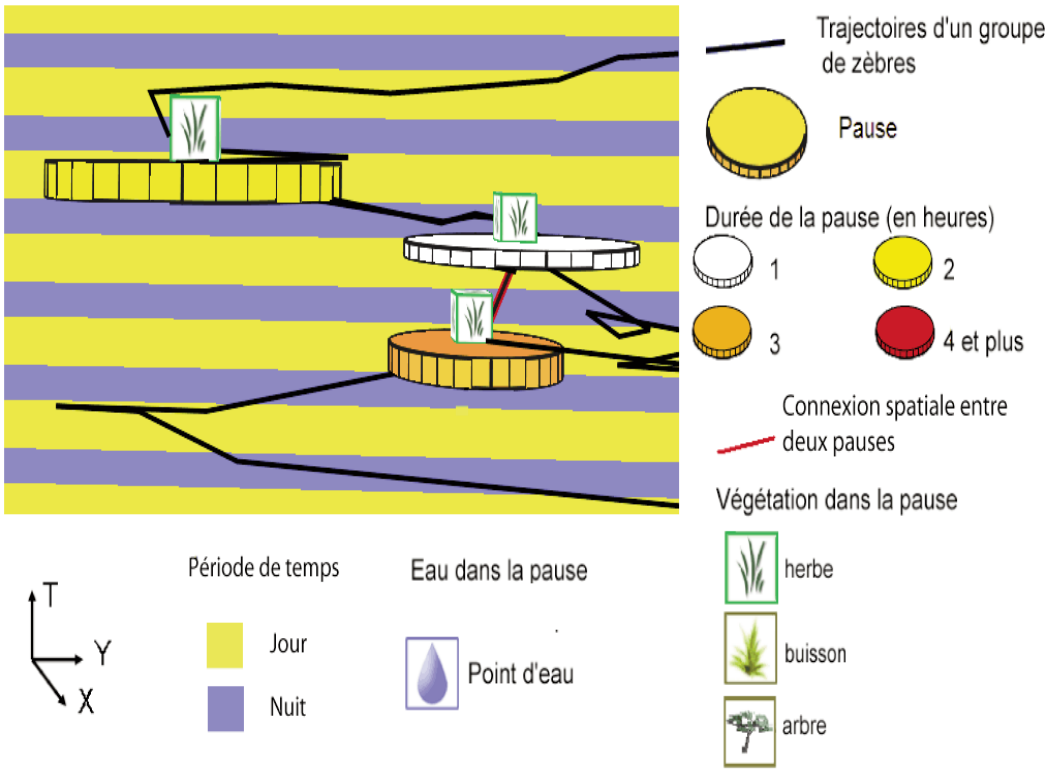

Figure 9 : La trajectoire d'un groupe de zèbres de jour et de nuit

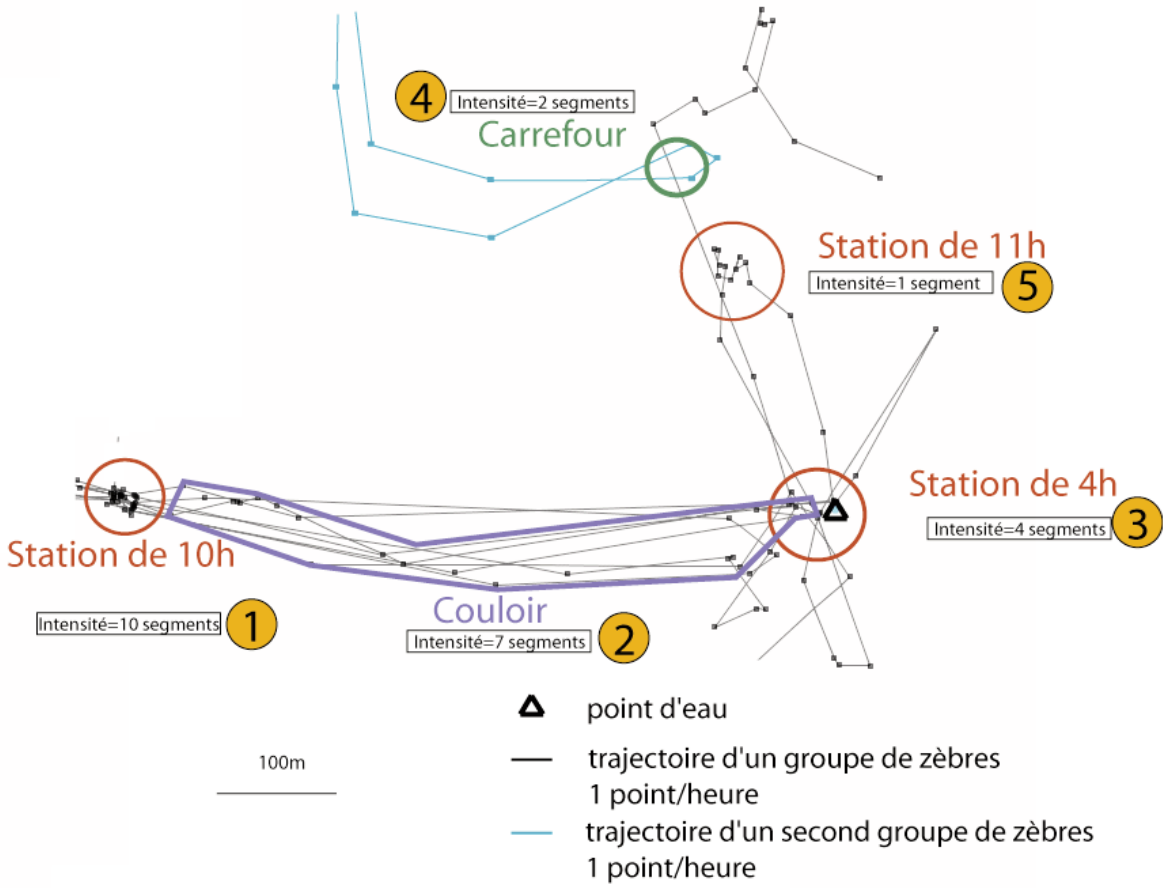

Figure 10 : Les intensités de fréquentation des zones attractives à partir de deux trajectoires, hiérarchisées de 1 pour la zone la plus fréquentée à 5

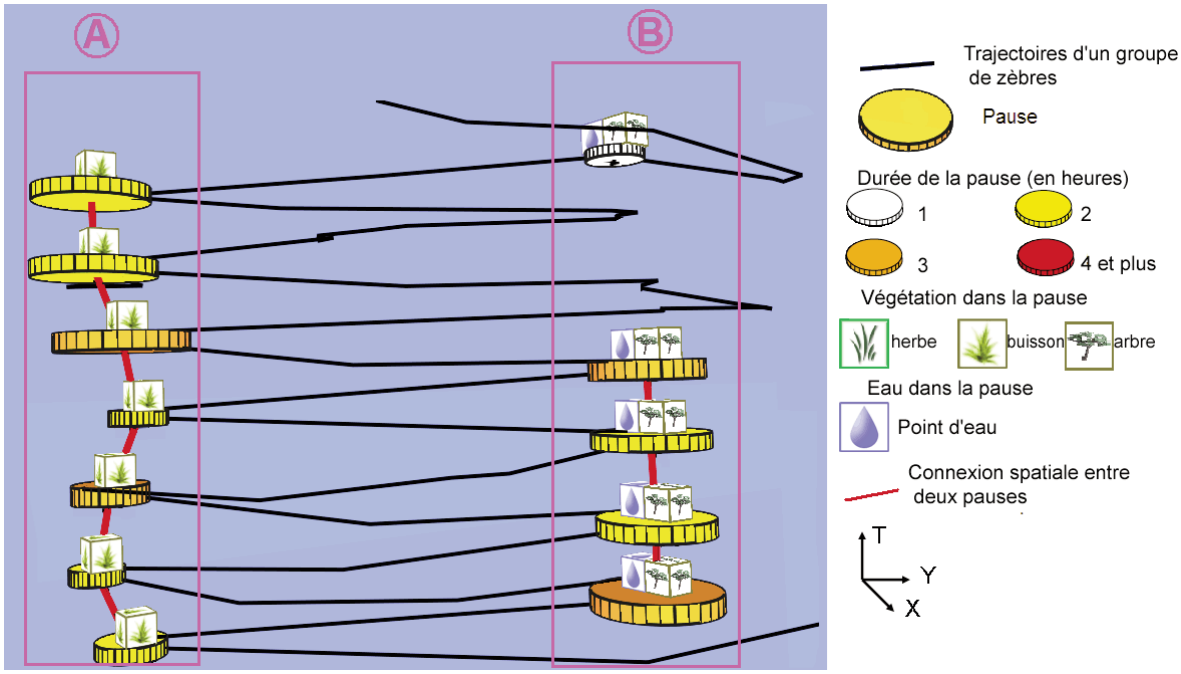

Figure 11 : Motifs temporels dans une trajectoire de zèbres

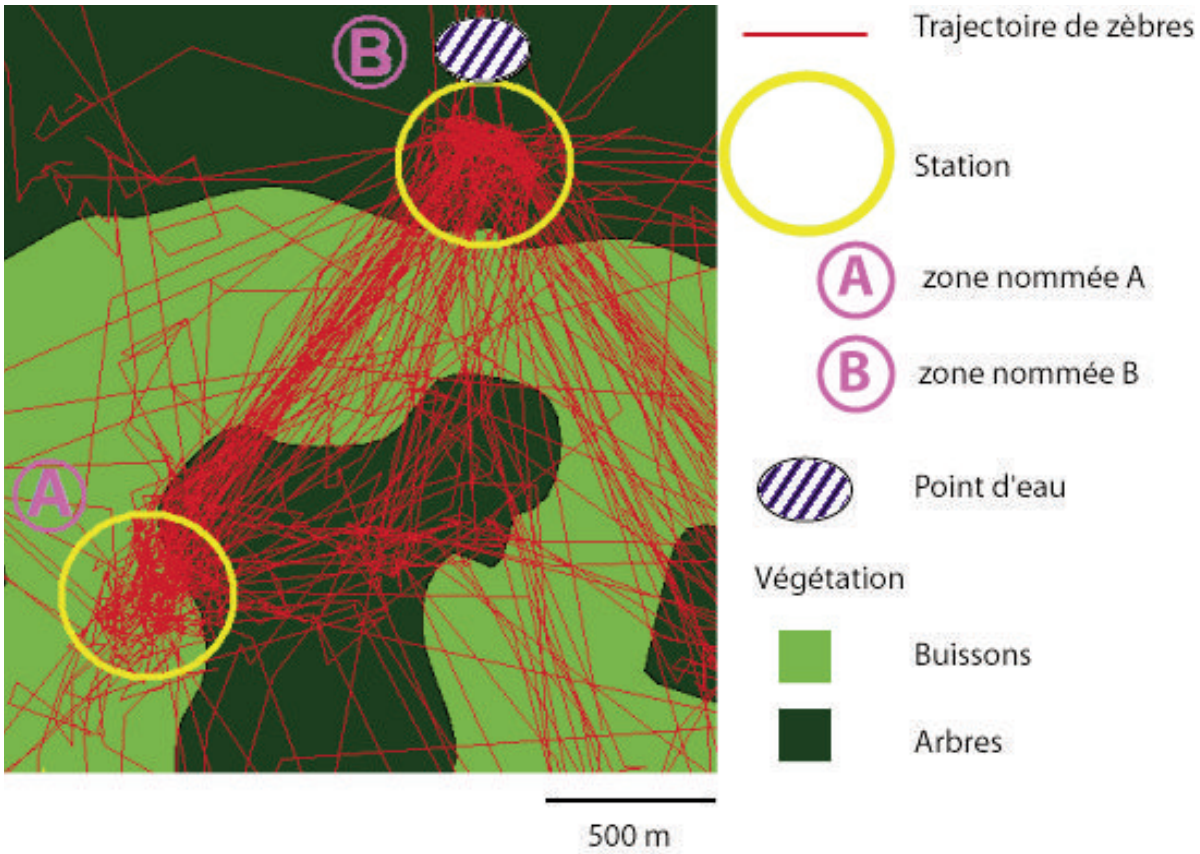

Figure 12 : La même trajectoire en 2D, avec des données environnementales, points d'eau et végétation

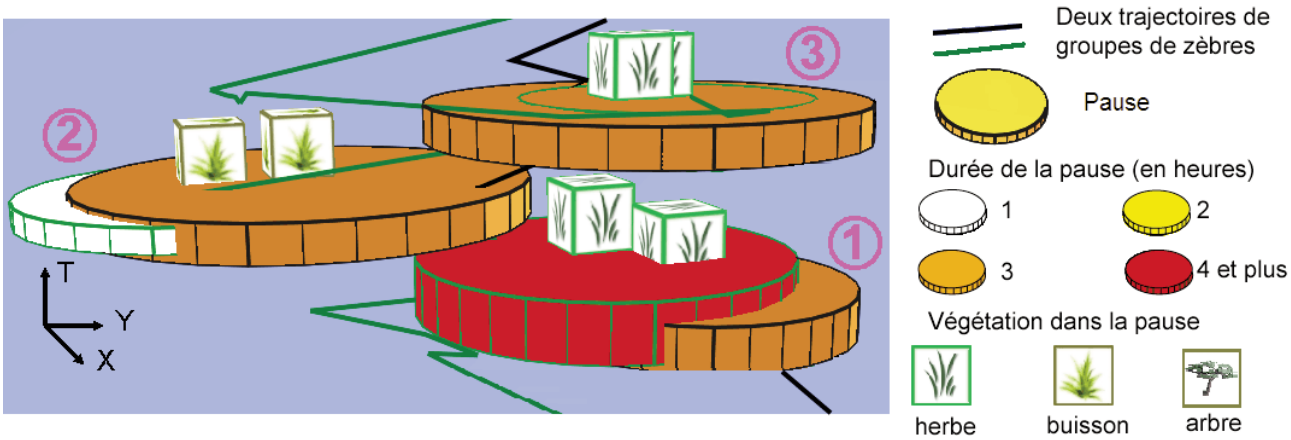

Figure 13 : Interactions entre deux groupes de zèbres