

Détermination des besoins d'une population Maya durant la période du Classique Tardif au moyen d'un modèle prédictif

■ Sébastien MERLET

Le projet El Pilar du "MesoAmerican Research Center" de l'Université de Californie à Santa Barbara est plus qu'un simple projet de parc archéologique maya. Localisé en Amérique Centrale sur la frontière entre le Belize et le Guatemala, sa responsable le docteur Anabel Ford a souhaité en faire un musée vivant et un laboratoire recréant et étudiant un environnement semblable à celui des Mayas de la période du classique tardif (550-990 de notre ère). Le parc et le projet associé ont donc aussi pour objectifs la compréhension et l'analyse du mode de vie des Mayas et de leurs descendants, notamment en termes de subsistance, et de proposer des possibilités de gestion durable de l'environnement pour les générations futures.

C'est dans ce contexte qu'a été conçu en 2004, par un étudiant de l'École supérieure des géomètres et topographes (ESGT), un modèle prédictif de l'emplacement de sites archéologiques Mayas (Monthus 2004), puis un modèle de population (Lamy 2008). Validés uniquement par plusieurs contrôles sur le terrain, ces versions nécessitaient une analyse supplémentaire confirmant les résultats auxquels elles conduisaient, et présentant une méthode fiable permettant la transposition de la méthode à de nouveaux projets dans les meilleures conditions. Cet article expose cette méthode et les nouveaux résultats qu'elle a permis d'obtenir, avant de présenter un modèle de subsistance et d'utilisation des sols par les Mayas durant le classique tardif.

■ MOTS-CLÉS

SIG, archéologie, modélisation, weights of evidence

Principes de la méthode prédictive utilisée

Différentes méthodes peuvent être utilisées pour la mise en place d'un modèle prédictif, celle employée dans le cadre de cette étude étant la méthode des *Weights of Evidence* (poids des preuves). Elle consiste à affecter aux classes de différents paramètres géoréférencés – par exemple les qualités de drainage ou la composition géochimique des sols – des poids décrivant l'affinité d'un phénomène étudié – par exemple la présence de gisements d'or ou de sites archéologiques – avec celles-ci. L'apparition de SIG permettant une organisation et une gestion avancée des données géoréférencées, et les possibilités qu'ils offrent en termes d'automatisation et de modélisation facilitent et accélèrent la mise en œuvre de cette méthode pour produire des cartes de modélisation à petite ou grande échelle. Elle s'applique dans ArcGis au moyen de l'application *ArcSDM* ajoutant, dans *ArcToolbox*, une boîte à outils dont les composantes permettent de créer un modèle au sein de *Model Builder*. Les formules mathématiques mises en œuvre pour la méthode des *Weights of Evidence* ne sont pas décrites ici, étant amplement présentées ailleurs (Sirjean 2003).

L'application *ArcSDM*, largement documentée, trouve son utilité dans le domaine de la prospection minière (Raines & Bonham-Carter 2006), mais elle est également parfaitement adaptée à une utilisation dans un cadre archéologique. La méthode des *Weights of Evidence* permet donc de calculer la probabilité de trouver des sites à un endroit particulier en fonction de différents paramètres pouvant être liés à l'environnement naturel (pente, distance aux points d'eau), ou encore à des phénomènes sociaux, par exemple les inter-

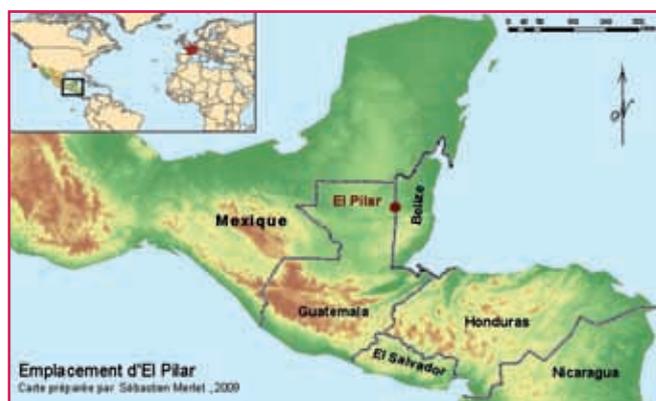


Figure 1. Localisation du parc archéologique d'El Pilar.

actions entre différents groupes d'individus.

Le modèle prédictif est tout d'abord "entraîné" au moyen de zones où les emplacements de points d'entraînement sont connus (transects²), produisant des poids associés à chaque classe d'évidence des paramètres. Ces poids servent alors à calculer les probabilités a posteriori au niveau de la zone d'étude, visualisées au moyen d'une image de résultat raster, comme le montre le schéma du modèle et des outils

- (1) NDLR : A la demande du jury du prix de l'AFT Sébastien Merlet a bien voulu accepter les corrections proposées et compléter son sujet qui mérite une publication dans XYZ.
- (2) Zones bien délimitées sur lesquelles toutes les occurrences d'un phénomène sont relevées afin d'obtenir un échantillon pouvant servir de base à un modèle. Dans le contexte de cette étude, les sites mayas obtenus au moyen de cette recherche systématique au niveau des transects sont qualifiés de "sites d'entraînement".

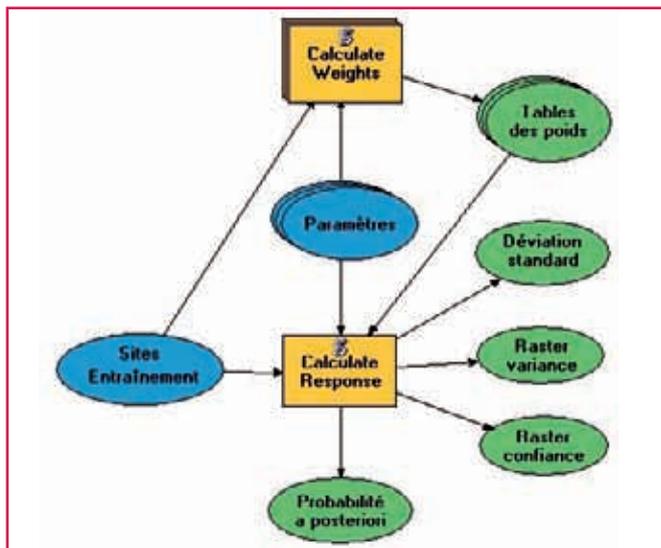


Figure 2. Modèle utilisé dans *Model Builder* pour l'application de la méthode des *Weights of Evidence*.

► d'ArcSDM utilisés (Figure 2). Lors de la mise en œuvre de cette méthode, plusieurs étapes peuvent être identifiées.

■ Choix des paramètres à tester

Les paramètres utilisés lors de la mise en application de la méthode sont choisis en fonction de plusieurs critères. Un de ceux-ci peut notamment être la présomption qu'un paramètre pourrait modifier les résultats du modèle : une étude préliminaire peut ainsi donner à penser que celui-ci aurait une influence sur la répartition des objets étudiés. Le critère de disponibilité des données est également à prendre en compte : une phase de récupération des données est parfois nécessaire, et un paramètre qui est considéré comme important peut ne pas être utilisé s'il n'est finalement pas disponible (par exemple des données relatives aux sols qui seraient manquantes).

Il est important que les classes d'évidence du paramètre étudié soient présentes de la même façon au niveau de la zone d'entraînement et de la zone d'étude (Wescott & Kuiper 2000) et la qualité des paramètres doit être considérée en termes d'adéquation à l'échelle du problème plutôt qu'en termes de précision absolue (Leusen 2002). Pour un projet archéologique, il est aussi important de prendre en compte le facteur temporel qui induit une part d'incertitude : par exemple le lit des rivières peut changer au cours du temps, ou encore la qualité des sols.

■ Sélection des zones d'étude et d'entraînement

Le choix des paramètres se fait évidemment de concert avec celui de la zone d'étude, et d'une autre servant pour l'entraînement. Cette dernière est une zone de référence sur laquelle des occurrences de sites sont connues, et que le logiciel va utiliser pour déterminer la corrélation entre ceux-ci et les paramètres (entraînement) avant de généraliser les poids à l'intégralité de la zone d'étude. Il est nécessaire pour obtenir un résultat de qualité de s'assurer que les para-

mètres utilisés les couvrent correctement, et que les données correspondantes proviennent de sources homogènes pour des raisons de cohérence. Si, par exemple, une des classes d'évidence d'un paramètre est absente de la zone d'entraînement, tous les poids calculés seront de fait faussés dans le résultat final.

Il est dans tous les cas préférable que la zone d'entraînement soit entièrement incluse dans un périmètre où le phénomène étudié a été pleinement recherché. Dans un contexte archéologique, cela se traduit par l'utilisation de zones de transects clairement délimitées, et dont tous les sites ont été recensés. Dans le cas contraire, des distorsions importantes peuvent apparaître, comme il sera expliqué dans la mise en application au projet étudié.

Une réflexion est également à mener sur le type de phénomène observé. À une échelle locale, les sites prédits – et utilisés pour l'entraînement – seront des bâtiments uniques ou encore des unités résidentielles, alors qu'à l'échelle d'un pays, il s'agira plus vraisemblablement de cités entières. Le terme de "prédiction" souligne le fait que le résultat indique où des sites devraient se trouver, sans que cela ne puisse être une certitude.

■ Calcul des poids associés aux classes d'évidence

Une fois les zones et sites étudiés définis, il convient de calculer les poids associés aux classes d'évidence. Cela est effectué de manière indépendante pour chacun des paramètres au moyen de l'outil *Calculate Weights* d'ArcSDM, qui analyse les classes d'évidence pour tel paramètre au regard des points d'entraînement, et attribue à chacune d'elles un poids pouvant être soit négatif (la probabilité de trouver des sites au niveau de cette classe est diminuée), soit positif (la probabilité est augmentée). Pour cette étape, seule la zone d'entraînement et les points qu'elle contient sont pris en compte.

Deux types de calculs sont disponibles pour chaque paramètre pour entraîner le modèle :

- *Categorical* : ce type de calcul est utilisé lorsque les classes d'évidence ne sont pas ordonnées.
- *Ascending* : ce type correspond à des classes d'évidence ordonnées, par exemple un paramètre de distance à un cours d'eau.

Le type le plus adapté doit être choisi, en prenant également en compte que :

- le type *categorical* peut faire apparaître des effets ignorés en utilisant l'autre type (par exemple un phénomène d'anneau : zone d'attraction entre 200 et 500 m)
- le type *ascending* est plus adapté à un paramètre ayant de nombreuses classes d'évidence contenant peu de sites

Pour les paramètres ordonnés, il sera donc toujours intéressant de considérer à la fois les résultats *categorical* et *ascending*. Cette étape conduit également à une généralisation des paramètres, à un nombre plus limité de classes d'évidence et donc à de plus grandes variations entre elles produisant des résultats moins ambigus. Dans le cas d'un calcul de type

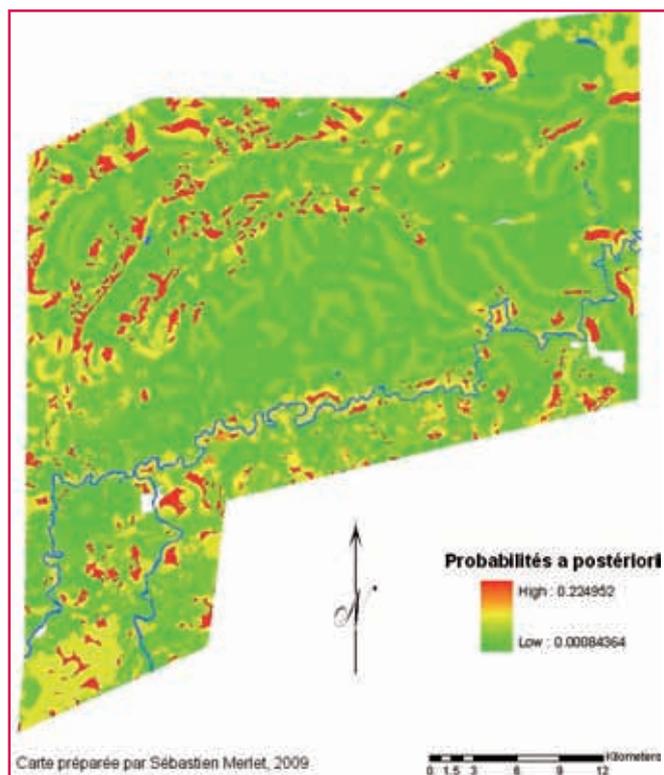


Figure 3. Modèle prédictif maya de 2004.

ascending, ArcSDM généralise en deux classes (pente inférieure ou supérieure à 30 % par exemple), alors que dans le cas contraire, celles-ci peuvent être plus nombreuses.

■ Calcul de l'image raster réponse

Le calcul de l'image raster réponse donnant les probabilités a posteriori consiste à appliquer les poids précédemment déterminés à la zone d'étude complète. Cela se fait en deux temps :

- généralisation des classes d'évidence des paramètres selon la reclassification donnée à l'étape précédente
- application des poids pour calculer les probabilités résultantes

Ce calcul est effectué au moyen de l'outil Calculate Response d'ArcSDM. Tous les paramètres et leurs poids sont cette fois-ci pris en compte pour obtenir le résultat, qui consiste en une carte de probabilités, telle que celle obtenue pour le modèle de 2004 (Figure 3).

Application au projet étudié

La zone d'étude représente dans le cas du projet étudié une superficie de 1 284 km², et est située sur la frontière entre le Belize et le Guatemala (Figure 4). Au sein de celle-ci sont identifiés un certain nombre de transects, dont trois avaient été utilisés en 2004 pour la création du modèle : les transects de Bacab Na, El Pilar, et Yaxox (en rouge). La nouvelle version du modèle prédictif en prend en compte trois nouveaux, dénommés Barton Ramie, Beaver Dam, et Cadena Creek (en violet).

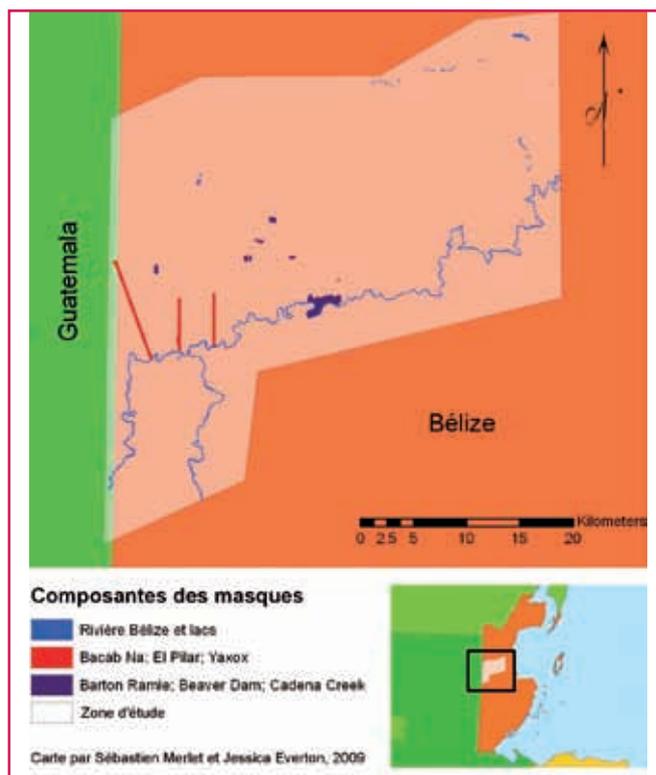


Figure 4. Zone d'étude et transects utilisés.

Ces transects comportent les sites utilisés pour entraîner le modèle, et qui sont dans ce cas des unités résidentielles mayas (ensembles de bâtiments appartenant à une même famille). Une nouvelle carte de probabilités a donc été recalculée dans le cadre de cette étude, en prenant en compte les éléments précédemment décrits.

■ Zones d'étude et d'entraînement

La zone d'étude correspond à celle utilisée en 2004. Sa forme particulière correspond à la zone de disponibilité des données concernant le sol, à savoir la fertilité et le drainage. La première différence vient donc du fait que les données de six transects sont utilisées pour la nouvelle version du modèle prédictif, au lieu de trois précédemment, dans le but de renforcer la qualité du résultat. La seconde, plus importante, concerne la zone d'entraînement.

Il a été précédemment signalé que cette zone doit être choisie de façon à être représentative de la zone d'étude à laquelle les résultats seront généralisés. Deux conditions doivent être vérifiées :

- toutes les classes d'évidence des paramètres présentes au niveau du masque d'étude doivent apparaître au niveau du masque d'entraînement,
- dans le cas où le masque d'entraînement ne correspond pas à l'étendue réelle des transects (zone effective de recensement des unités résidentielles), la proportion de chacune des classes d'évidence au niveau de ceux-ci doit être la même qu'au niveau de la zone d'étude, ce point étant explicité plus précisément dans le mémoire correspondant à cette recherche (Merlet 2009).

La zone d'entraînement utilisée en 2004 correspondait à la



zone d'étude totale, tandis que celle de 2009 – qui sera à l'avenir qualifiée de "masque 2009" – est constituée par l'union des étendues des six transects présents sur la zone d'étude. Le premier point sera donc à contrôler pour les résultats de 2009, tandis que le second point est à vérifier pour valider les résultats de 2004. Quelles sont les répercussions en termes de calcul des poids ?

■ Calcul des poids pour les paramètres

Quatre paramètres sont pris en compte pour la conception du modèle prédictif :

- la distance aux rivières, définie en 21 classes par des tampons générés autour de celles-ci tous les 100 m
- la fertilité des sols, définie en quatre classes, de 1 (très bonne) à 4 (très mauvaise)
- le drainage des sols, défini en quatre classes, de 1 (très bon) à 4 (très mauvais)
- la pente topographique, définie en cent classes d'amplitude 1 %

Distance aux rivières

L'analyse effectuée en 2004 concluait que les Mayas s'installaient de préférence à des distances situées de 500 m à 1000 m des rivières. Cependant, ce paramètre est-il réellement utilisable ? En considérant le ratio entre la proportion de chacune des classes au niveau du masque d'étude par rapport à leur proportion au niveau des transects, il apparaît que ce n'est pas le cas (Figure 5). Dans l'idéal, celui-ci devrait en effet valoir 1, une valeur inférieure montrant une sous-représentation de la classe, tandis qu'une valeur supérieure montre une sur-représentation. Deux problèmes majeurs apparaissent :

- au-delà de 900 m, les classes sont sous-représentées au niveau des transects de 2004, et sur-représentées en deçà, ce qui remet totalement en cause le résultat (seconde condition non vérifiée)
- les classes au-delà de 1 300 m ne sont représentées ni au niveau des transects de 2004, ni au niveau de ceux de 2009, les poids ne peuvent donc pas être généralisés à la zone d'étude complète.

Dans ce cas, il apparaît que le résultat précédemment obtenu ne peut être considéré comme valide, il est donc nécessaire de reclassifier afin d'obtenir une meilleure répar-

tition des classes d'évidence. L'étude des résultats montre alors que le paramètre de distance aux rivières n'a pas d'effet quantifiable en termes de choix d'installation pour les Mayas, et ne doit donc pas être pris en compte (Merlet 2009).

Drainage et fertilité des sols

Le paramètre de drainage comporte quatre classes d'évidence, toutes représentées au niveau des masques de 2004 ou de 2009. Il est ici intéressant de considérer le type d'entraînement utilisé pour le calcul des poids. Le modèle de 2004 avait été réalisé en appliquant un type *ascending*, adapté à des paramètres à classes ordonnées, ce qui est bien le cas ici. Un des désavantages de cette méthode réside dans le fait que la reclassification effectuée est binaire: deux classes d'évidence en résultent, ce qui peut mener à une perte d'information.

Dans le cas de paramètres ayant un faible nombre de classes, il est intéressant d'utiliser un type *categorical*, qui peut être considéré comme valide si les poids calculés apparaissent bien ordonnés. Ce fait apparaît clairement ici: un calcul de type *ascending* (Figure 6) qui agit de manière cumulative entraîne une binarisation en deux classes de poids respectifs 0.26 et -1.64, alors qu'un calcul de type *categorical* conserve quatre classes dont les poids sont ordonnés selon ce qui pouvait être attendu, et qui fait apparaître des effets plus importants (Figure 7). Il apparaît ainsi

Drainage <i>ascending</i>			
Classe	Sites	Généralisation	Poids
1	113	1	0,2638
2	234	1	0,2638
3	247	2	-1,6436
4	247	2	-1,6436

Figure 6. Poids pour un drainage de type *ascending*.

Drainage <i>categorical</i>			
Classe	Sites	Généralisation	Poids
1	113	1	1,0115
2	121	2	-0,1361
3	13	3	-1,0043
4	0	4	-8,063607

Figure 7. Poids pour un drainage de type *categorical*.

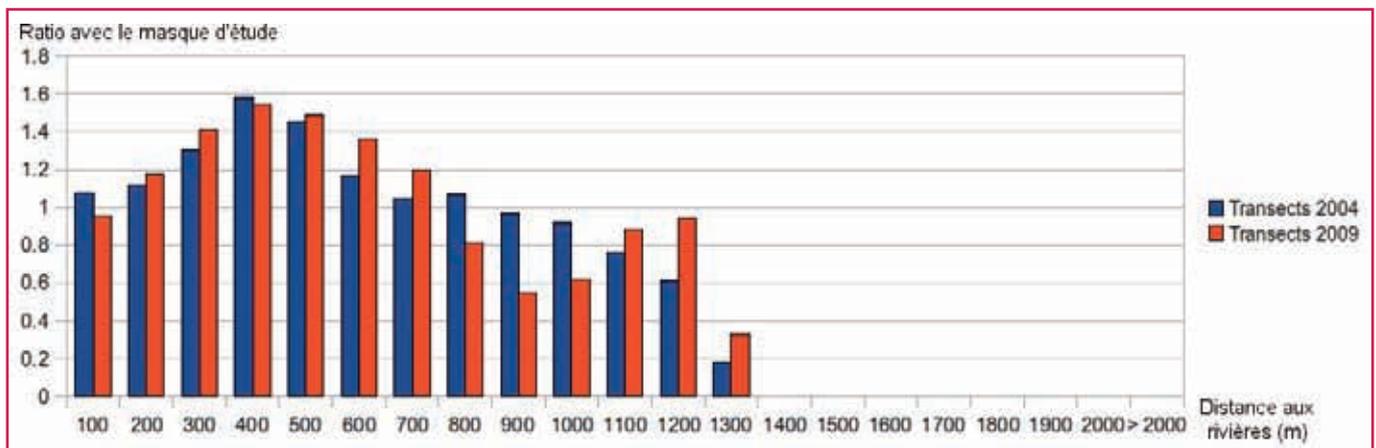


Figure 5. Ratios des classes d'évidence de la distance aux rivières pour les différents masques.



Fertilité <i>ascending</i>			
Classe	Sites	Généralisation	Poids
1	196	1	1,1791
2	247	2	-1,2978
3	247	2	-1,2978
4	247	2	-1,2978

Figure 8. Poids pour une fertilité de type *ascending*.

Fertilité <i>categorical</i>			
Classe	Sites	Généralisation	Poids
1	196	1	1,1791
2	51	2	-0,8968
3	0	3	-8,727005
4	0	3	-8,727005

Figure 9. Poids pour une fertilité de type *categorical*.

que la classe 4 (très mauvais drainage) ne comporte aucun site et a un poids très négatif, nuance que l'on perdait dans la version précédente.

Le même phénomène se produit pour la fertilité : un calcul de poids de type *ascending* conduit à une reclassification en deux classes (Figure 8), alors que le type *categorical* produit trois classes avec des écarts bien plus importants (Figure 9). Pour ces deux paramètres, il apparaît donc que les Mayas privilégiaient les sols comportant un bon drainage et une bonne fertilité, et évitaient au contraire fortement les autres zones. Le modèle de 2009 augmente également le nombre de classes qui seront prises dans le résultat final, ce qui conduira à un résultat plus précis (les niveaux de confiance sont également à prendre en compte mais ne seront pas abordés dans le cadre de cet article).

Pente topographique

Le dernier paramètre considéré est la pente topographique. Du fait du très grand nombre de classes – une centaine – et du caractère de ces classes, un entraînement de type *ascending* est effectué. Deux classes en découlent :

- les pentes inférieures à 33%, recevant un poids positif: 0.03
- celles supérieures à 33%, recevant un poids négatif: -1.65

■ Calcul de l'image raster de probabilités

Comme expliqué précédemment, les poids calculés sont appliqués à la totalité de la zone d'étude pour les paramètres reclassifiés. Le résultat est une carte de probabilités, présentée en Figure 10. Les valeurs de celles-ci en tant que telles ne peuvent être directement comparées aux valeurs de 2004 (Figure 3) : les points ayant servi à l'entraînement n'étant pas les mêmes, les probabilités a priori et a posteriori sont forcément très différentes. En revanche, il est possible de comparer l'aspect des résultats, les fortes probabilités apparaissant en rouge, les faibles en vert.

Il apparaît ainsi qu'un certain aspect "en serpent" très clair en 2004 et qui était dû à la zone de prédilection de 500 m à 1000 m des rivières disparaît dans le nouveau résultat du fait de la suppression de ce paramètre, ce qui augmente l'impact des autres paramètres.

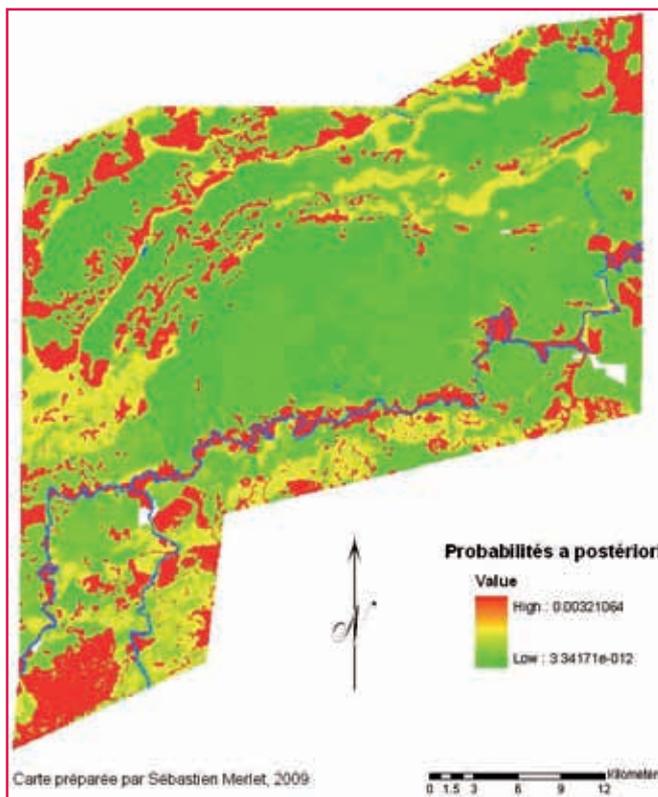


Figure 10. Modèle prédictif maya de 2009.

Cette carte est cependant difficile à interpréter en termes quantitatifs. Comment dès lors passer de ce modèle prédictif à un modèle de population ?

Création du modèle de population

Il convient dès lors de passer des probabilités à des densités de population. La méthode appliquée est relativement simple et classique, puisqu'elle va consister à calculer les densités correspondantes au niveau des transects (Lamy 2008). Une première reclassification du résultat est pour cela nécessaire afin de limiter le nombre de classes de probabilités pour permettre d'obtenir une solution convenable. Une valeur de cinq classes de probabilités a été considérée comme pertinente à cet effet (Figure 11), celles-ci allant de 1 (faible probabilité) à 5 (forte probabilité).

■ Prise en compte d'un paramètre social

Plutôt que de servir au calcul direct des densités, ce premier résultat va en fait permettre d'intégrer un paramètre social au modèle, basé sur l'idée que les zones à fortes probabilités provoquent une attraction sociale plus importante que les autres. Un nouveau paramètre constitué de tampons de distance aux classes 1 et 2 est donc testé par la méthode précédemment utilisée. Le résultat fait apparaître après généralisation un paramètre à quatre classes : les deux premières correspondent aux classes de fortes densités de la carte, la troisième à un tampon de 500 m autour de celles-ci, et la dernière aux distances supérieures à cette valeur (Figure 12).



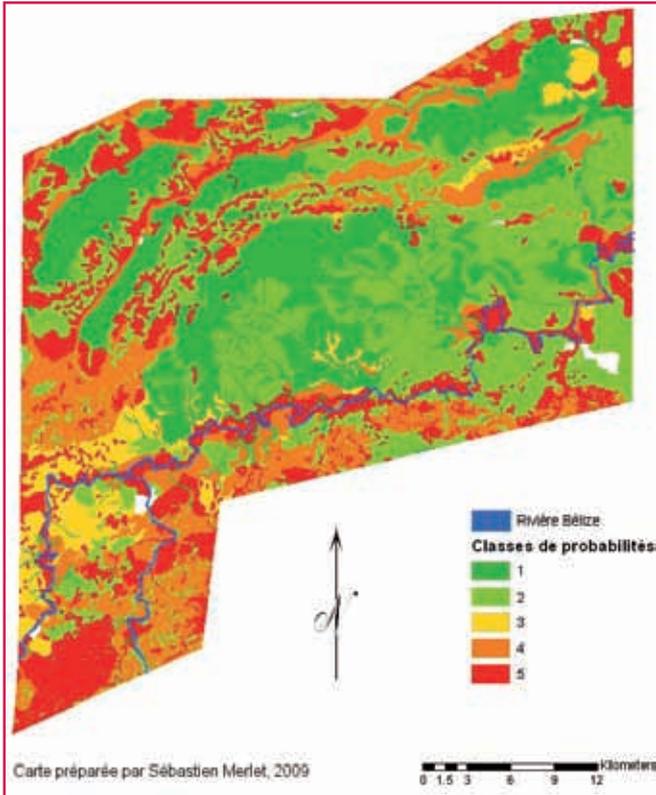


Figure 11. Probabilités reclassifiées, version 1.

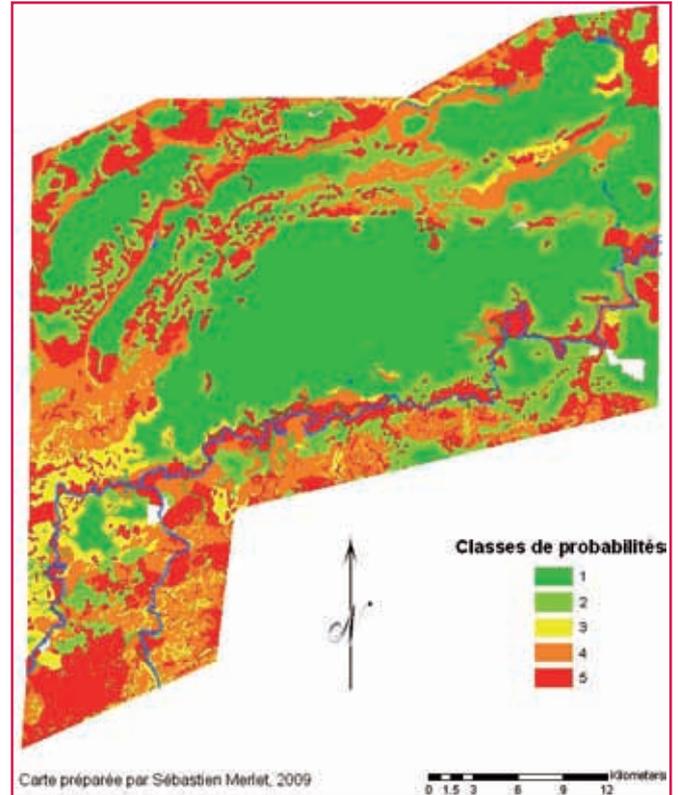


Figure 13. Probabilités reclassifiées, version 2.

Attractivité des zones à fortes probabilités			
Classe	Sites	Généralisation	Poids
1	307	1	0,57
2	88	2	0,14
3	52	3	-0,93
4	1	4	-4,19

Figure 12. Poids pour l'attractivité sociale.

Un nouveau calcul du modèle complet en incluant ce paramètre supplémentaire et ses poids produit une nouvelle carte de probabilités, qui après reclassification est présentée en figure 13. L'effet de l'attrait des classes à fortes probabilités est ici clairement visible.

■ **Passage à des densités de population**

Plusieurs hypothèses sont prises en compte pour un passage aux densités de population. Tout d'abord, il est considéré que

95 % des sites recensés étaient réellement occupés lors de la période du classique tardif. Les sites d'un diamètre inférieur à 20 m ne comportant qu'une seule structure ne sont pas utilisés pour le calcul de la population, jouant plus vraisemblablement le rôle d'unité de stockage. Enfin, la valeur moyenne de 5,6 habitants par unité résidentielle occupée (URO) sert à calculer les densités (Lutz et al. 2000).

La Figure 14 présente le calcul des densités de population au moyen du nombre d'URO présentes au niveau de chaque classe de probabilité pour la zone des transects:

$$\text{densité_classe} = \text{nombre_URO} * 5.6 / \text{superficie_classe}$$

Ces densités sont utilisées pour propager le résultat à la zone d'étude totale: le fait que les classes de probabilité n'y soient pas représentées dans les mêmes proportions n'est donc pas un problème. Multipliées par la superficie de celles-ci, elles permettent alors de calculer la population totale de la zone d'étude (Figure 15), ainsi que le nombre d'URO correspondant.

Masque des transects						
Classe	URO classique tardif	Superficie (km ²)	Population	Densité	% population	% de la zone
1	0	2,01	0	0	0%	22%
2	11	0,51	64	124,4929797	3%	6%
3	28	1,20	154	128,695362	8%	13%
4	53	1,57	298	190,2912621	15%	17%
5	259	3,72	1452	390,2515047	74%	41%
Total	352	9,01	1968	218,45867	100%	100%

Figure 14. Densités de population pour les classes de probabilité, au niveau des transects.



Totalité de la zone d'étude						
Classe	URO classique tardif	Superficie (km ²)	Population	Densité	% population	% de la zone
1	0	484,67	0	0	0%	38%
2	5403	243,03	30255	124,4929797	17%	19%
3	1753	76,29	9818	128,695362	5%	6%
4	7643	224,92	42800	190,2912621	23%	18%
5	17808	255,54	99727	390,2515047	55%	20%
Total	32607	1284,46	182600	142,1614198	100%	100%

Figure 15. Répartition finale de la population pour la zone d'étude.

■ Analyse du résultat

L'intérêt d'avoir construit un modèle prédictif amenant à l'identification de différentes classes de probabilité pour calculer la population de la zone apparaît bien dans le résultat. Une méthode consistant juste à considérer la densité moyenne pour le masque des transects pour l'appliquer à la zone d'étude aurait conduit à l'utilisation de la valeur de 218 hab./km², quand la distinction de cinq classes permet d'obtenir une moyenne finale de 142 hab./km². Cette densité peut paraître élevée, mais est similaire à des valeurs de 150 – 200 hab./km² avancées par d'autres auteurs par exemple (Culbert, cité dans Lutz et al. 2000).

Il ressort également que la classe la plus peuplée a une densité très importante de 390 hab./km², alors qu'au contraire la classe 1 n'est pas habitée. Il apparaît que cette dernière coïncide relativement bien avec les zones de marais et marécages présentes au niveau de la zone d'étude, ne permettant pas la culture du maïs (Wright et al. 1959).

Au final, 78% de la population est donc concentrée sur 38% du territoire, alors que 38% de la zone est au contraire occupée. La dernière partie de cette étude consiste alors à déterminer les besoins d'une telle population en termes de maïs et de sols. Les Mayas de la zone d'étude disposaient-ils de suffisamment de terres pour pratiquer un modèle durable d'agriculture, ou souffraient-ils de la pression démographique comme l'avancent certains auteurs pour expliquer le déclin de cette civilisation ?

Mise en place d'un modèle d'occupation des sols

La mise en place d'un modèle d'occupation des sols se fait en prenant en compte les particularités du peuple maya. Il est couramment admis que 34% de l'alimentation des Mayas provient du maïs (Canto 2003), dont la culture va justifier l'occupation des sols. Le modèle d'agriculture traditionnel est basé sur le cycle du milpa, qui consiste en une culture sur brûlis avec rotation des terres. Un même champ de maïs (appelé milpa) est utilisé au maximum pour quatre récoltes avant que la compétition des nuisibles et herbes indésirables n'amène à utiliser un autre (Nations & Nigh 1980). Ce champ revient alors à l'état de forêt afin d'être réutilisé dans un nouveau cycle. Dans le cadre de cette étude, il a été décidé de considérer une récolte par an, d'où une utilisation du milpa de quatre années.

Population totale de la zone	182 600 habitants
Besoins par jour par personne (WFP 2009)	2 100 kcal
Besoins par an pour la population	139 675 305 000 kcal
Pourcentage de l'alimentation provenant du maïs	34,00%
Apport nécessaire par an par le maïs	47 489 603 700 kcal
Apports d'un kilogramme de maïs	3 551 kcal
Total de maïs nécessaire par an pour la population	13 373 586 kg
Production de maïs par an par hectare	588 kg/ha
Superficie nécessaire pour le maïs	227 km²

Figure 16. Superficie nécessaire pour le maïs.

En considérant des besoins quotidiens journaliers minimaux de 2100 kcal en moyenne pour mener une vie saine, il est possible de déterminer les besoins annuels de la population de la zone d'étude, ainsi que les apports nécessaires en termes de maïs et donc de sols (Figure 16). Il est à noter que la valeur de 588 kg de maïs produits par hectare correspond à la productivité avancée par Kathleen Rose au niveau du site de Tikal (Rose 2003). Le lecteur pourra se référer au formulaire de calcul disponible sur le site <http://www.sebeto.fr/modele-predictif-maya-40.php> afin de constater combien les valeurs provenant d'autres sources peuvent influencer sur le résultat final.

La superficie de terres cultivables disponibles au niveau de la zone d'étude, calculée en retirant la classe 1 de terres non cultivables ainsi que la superficie de l'emprise au sol des unités résidentielles et des structures communes, est de 733 km². Chaque unité résidentielle occupée dispose d'un jardin privatif de 4 000 m² comportant 30 % de milpa, ce qui donne donc au final une superficie restante disponible de 603 km² pour des besoins en milpa de 188 km².

En considérant qu'il doit y avoir suffisamment de terres pour permettre la régénération de la forêt à la fin de l'utilisation d'un milpa, il apparaît donc finalement que la longueur maximale du cycle du milpa appliqué pour cette zone d'étude est de douze ans. Dans ce cas, la superficie de milpas en régénération est en effet deux fois supérieure à celle des milpas utilisés, chiffre obtenu grâce à la formule :

$$\text{proportion_milpa_régénération} = \frac{\text{durée_totale_cycle}}{\text{durée_utilisation_milpa}} - 1$$

Dans ce cas, 39 km² de terres cultivables restent de plus non utilisés par les Mayas (Figure 18).



Jardin privatif par unité résidentielle occupée (URO)	4000 m ²
Pourcentage de milpa (maïs)	30%
Superficie de verger par URO	2800 m ²
Superficie de milpa par URO	1200 m ²
Superficie totale de milpa	39 km ²
Superficie totale de jardins privés	130 km ²
Superficie nécessaire de milpa restante	188 km ²
Superficie de terres cultivables encore disponibles	603 km²
Superficie nécessaire pour le maïs	227 km²

Figure 17. Bilan des superficies restantes et nécessaires après prise en compte des jardins privés.

Superficie nécessaire de milpa	188 km ²
Superficie nécessaire pour le reste du cycle	376 km ²
Superficie totale nécessaire	564 km²
Superficie finale laissée à la nature	39 km²

Figure 18. Bilan final avec un cycle du milpa de 12 ans.

Conclusion et perspectives

L'utilisation des capacités de modélisation des systèmes d'information géographique peut apporter une nouvelle vision au sein de projets archéologiques. Les possibilités avancées d'analyse des données amènent à produire de nouveaux résultats conduisant à de nouvelles pistes de recherches.

Cependant, il apparaît également qu'une méthodologie bien précise doit être appliquée, les risques de mauvaise interprétation de certains résultats étant bien présents. La conception et l'amélioration du modèle prédictif au sein du projet El Pilar et le modèle de population auquel il a donné naissance ont donné matière à une réflexion nouvelle sur la relation entre les Mayas et leur environnement, et, le contexte des calculs ayant été posé, la prochaine étape consistera maintenant à déterminer plus précisément la productivité réelle des milpas au niveau de la zone d'étude. Avec une densité de population presque dix fois supérieure à celle actuelle du Belize, les anciens Mayas parvenaient à nourrir leurs familles tout en laissant une part importante à la forêt. La technique du cycle du milpa, toujours perpétuée de nos jours par les jardiniers forestiers Mayas traditionnels, pourrait jouer à l'avenir un rôle important dans la protection de la forêt et la mise en place d'un développement durable respectueux de la nature au Belize (Nigh 2008), rôle que les études futures devront quantifier plus précisément.

Les résultats obtenus sont également un facteur d'encouragement supplémentaire pour tous les projets archéologiques qui souhaiteraient se lancer dans la mise en place d'un système similaire. Avec les possibilités toujours plus poussées des logiciels tels qu'ArcGIS et d'applications telles qu'ArcSDM, il y a fort à parier que les SIG sont loin d'avoir fini d'acquiescer leurs lettres de noblesse dans le domaine de l'archéologie. ●

Contact

Sébastien MERLET
sebeto@ymail.com

Bibliographie

- Canto, G., 2003. *Faculty of agriculture and natural resources visit*, edited by K. Rose, San Ignacio, Cayo.
- Lamy, G., 2008. *Utilisation de l'outil SIG dans la cartographie de sites archéologiques mayas*, application pour la modélisation de la population (ESGT).
- Leusen, P.M., 2002. *Pattern to process: methodological investigations into the formation and interpretation of spatial patterns in archaeological landscapes*. Available at:

ABSTRACT

Geographic Information Systems (GIS) are more and more widely used tools in archaeology, fact which can be linked with the possibilities that they offer to acquire, store, analyse and share archaeological data. It's quite naturally that archaeologists have begun to get interested in the always more advanced possibilities of these tools, especially for modelization and prediction. It's as a member of the team of the El Pilar archaeological project, directed by doctor Anabel Ford of the University of California at Santa Barbara, that I got involved in researches about the subject. By taking into account the general recommendations raised in numerous papers about the subject, the study presented in this article aims at introducing and developing the steps involved in the validation of a predictive model of archaeological sites, the development of a population model, and a modelization of the land use patterns of a Maya population during the Late Classic period.