

Les apports de la cartographie moderne en systématique

par Pierre RASMONT, Stéphanie ISERBYT & Yvan BARBIER

Laboratoire de Zoologie, Université de Mons-Hainaut, B-7000 Mons (Belgique)
pierre.rasmont@umh.ac.be

Résumé. – Les débuts de la systématique ignoraient la biogéographie. Au contraire, les concepts taxonomiques modernes considèrent la distribution géographique comme un véritable caractère, au même titre que la morphologie, l'écologie ou l'éthologie.

On s'est pendant longtemps contenté de connaître le pays d'origine des échantillons. Par après, on s'est efforcé de toujours y associer un nom de localité. Depuis 1991, l'arrivée de la technologie GPS ou GLONASS a profondément modifié les pratiques. La précision des coordonnées géographiques figurées sur les étiquettes entomologiques est passée de 10 km, précision souhaitée par la EIS-CIE-EEW, dans les années 70, à 1 km dans les années 80, 100 m au début des années 90 et 10 m en 2001. Avec l'arrivée du DGPS et surtout d'EGNOS-WAAS, on arrive maintenant à une précision métrique. Cette précision accrue de 4 ordres de grandeur va permettre, dans le futur immédiat, une connaissance beaucoup plus fine des exigences écologiques des espèces ainsi que de la structure des populations. Une nouvelle discipline est en train de naître : la biotopographie.

Summary. – **The contributions of modern mapping for systematic.** In the beginning of the systematics, the biogeography was not at all existing. On the contrary, the modern concepts of taxonomy take the geographical distribution as a good character, at the same level as morphology, ecology or ethology.

During long time, it has been considered as satisfying to know just the country of a sample. In a second time, it have been necessary to add a locality name. Since 1991, the GPS and GLONASS technology give the opportunity to deeply modify the practices. The precision of the geographical coordinates written on the insects labels could increase by 4 orders of magnitude: 10 km in the years '70, as recommended by the EIS-CIE-EEW, 1 km in the '80, 100 m in the early '90 and 10 m since 2001. With the arrival of DGPS and, before all, EGNOS-WAAS, we reach a precision of 1 m. In a next future, this new precision will dramatic increase the knowledge of species ecological requirements and their populations structures. A new discipline is born: the Biotopography.

Mots clés. – Cartographie, biogéographie, systématique, entomologie.

La carte de distribution est devenue un document de base de la systématique. Elle est devenue très familière à tous les naturalistes du fait de sa figuration ubiquiste dans les guides de terrain. On y figure là, en même temps qu'un dessin en couleur de l'habitus de l'espèce, une petite carte indiquant la distribution de chacune. Cette distribution est indiquée le plus souvent sous la forme d'une surcharge uniforme, parfois avec des nuances de couleur. Cette figuration a pour défaut de laisser croire qu'à l'intérieur de cette zone, tout est connu et qu'à l'extérieur de cette zone, la présence de l'espèce est anormale (fig. 1).

Pour pallier ces défauts, et pour donner aussi une information représentative de véritables observations vérifiées, on préfère largement une représentation cartographique ponctuelle des distributions (fig. 2).

Enfin, la matérialisation d'efforts d'enquêtes détaillées est, le plus souvent, figurée par une représentation ponctuelle dans une grille d'échantillonnage (fig. 3).

Ces trois types de cartes sont devenues extrêmement fréquentes dans les travaux de systématique. Au point qu'un auteur a pu parler de "*mapmania*" (DEEMING, 1979). Le professeur Jean Leclercq, ici même, a présenté un exposé en 1983 pour préciser les buts de la cartographie des espèces. Nous ne reviendrons donc pas ici sur les raisons même de l'absolue nécessité de la cartographie des espèces.

Simplement, nous allons montrer que les progrès successifs de la cartographie et surtout des outils mis à la disposition des naturalistes que nous sommes, que ces progrès ont accompagné, voire conditionné, notre vision de la systématique.

Nous aboutirons rapidement à montrer que les progrès de ces outils ont été gigantesques durant la dernière décennie. A tel point que nous pouvons parler de révolution.

LES PREMIERS USAGES DE LA CARTOGRAPHIE

Dans un premier temps (18^e siècle), les cartes ont été essentiellement des documents secrets. La course à la conquête colonisatrice entre la France, l'Angleterre, l'Espagne, le Portugal et les Pays-Bas était telle que les documents cartographiques établis par les voyageurs et les scientifiques étaient considérés comme stratégiques et n'étaient pas divulgués.

Les naturalistes qui accompagnaient les expéditions ramenaient des échantillons abondants mais la publication des descriptions ne signalait que très approximativement l'origine géographique des taxons. Ainsi, les travaux de Linné ou de Fabricius ne mentionnent que de manière laconique la "patrie" des taxons. Il n'y avait, à l'époque, pas même l'idée d'une "biogéographie".

Buffon est sans doute le premier naturaliste à prendre sérieusement en considération le fait que la distribution géographique fait partie des caractéristiques fondamentales des espèces. L'apport d'Alexandre de Humboldt est ensuite déterminant. Avec lui, chaque échantillon naturaliste est accompagné d'une localisation précise, d'une mesure de l'altitude et de la température. Il découvre ainsi que chaque taxon a des exigences éco-climatiques qui lui sont propres et qui expliquent la zonation des paysages. Les premières cartes un tant soit peu détaillées publiées datent de cette époque (début du 19^e siècle). On peut dire que le double apport successif d'Humboldt et de Wallace marque la naissance d'une nouvelle discipline : la biogéographie.

Un autre pas gigantesque est franchi en 1909 par Oscar Vogt. Celui-ci s'interroge sur la nature même du concept d'espèce (VOGT, 1909, 1911). Il émet la proposition que le processus de spéciation est principalement le résultat d'isolements géographiques suite à des rétrécissements historiques de la distribution initiale.

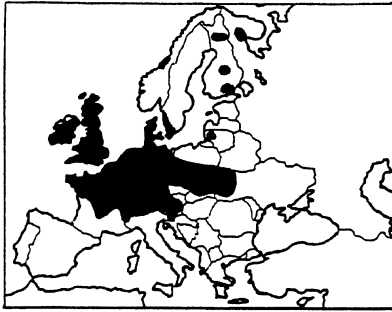
Dès ce moment, il devient net que la distribution géographique est non seulement une caractéristique de l'espèce mais qu'elle est aussi un fondement de son existence même. Les naturalistes se sont dès lors consacrés à accompagner leurs descriptions de taxons nouveaux de cartes indiquant de manière précise les localités d'observation.

A la suite de l'école inaugurée par Dobzhansky, Huxley et Mayr, la "*nouvelle systématique*" impose depuis 1942 le concept "*biologique*" d'espèce. En dehors de caractères visibles sur des spécimens de collections, l'espèce présente aussi des caractéristiques écologiques et éthologiques. Il ne suffit plus de décrire sa morphologie mais il est encore nécessaire de compléter la caractérisation par de patientes observations et expérimentations (DOBZHANSKY, 1937 ; HUXLEY, 1940 ; MAYR, 1963).

On arrive ainsi à l'exemple extrême d'espèces jumelles qui ne se manifestent pas par des caractères visibles mais par toute une "histoire naturelle", par une génétique et par une distribution géographique (MAYR, 1963). C'est, en quelque sorte, une revanche de Buffon sur Linné.

Dans les années 50, la biométrie est arrivée comme un outil supplémentaire d'étude de la morphologie. Cela a donné naissance à une nouvelle discipline complexe : la *taxonomie numérique* (SOKAL & SNEATH, 1963). On a alors pris l'habitude de représenter les relations entre taxons sous la forme de diagrammes issus des méthodes d'ordination (dont l'Analyse en Composantes Principales) et de groupement (les dendrogrammes). L'utilisation, en parallèle, des mêmes méthodes sur des ensembles de données de distribution et de paramètres géographiques a donné naissance à une autre discipline connexe à la systématique : l'*écologie numérique* (LEGENDRE & LEGENDRE, 1984).

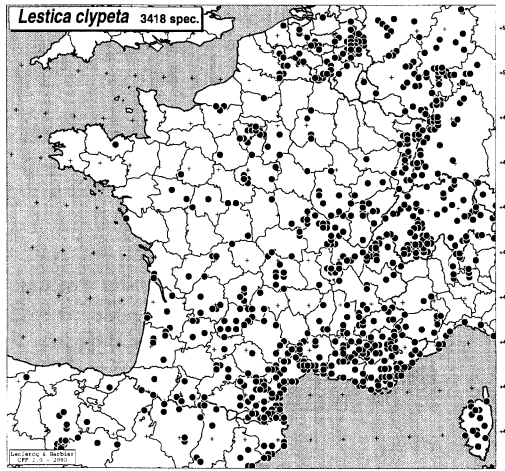
L'apparition de la cladistique (HENNIG, 1950, 1966) a considérablement augmenté la valeur scientifique de la classification (ou "macrosystématique") en lui conférant des outils de vérification de la "réfutabilité" des hypothèses.



1



2



3

Fig. 1 à 3. – 1, Distribution figurée en surcharge uniforme de *Sesia bembiciformis* (Hübner) (d'après LASTUVKA & LASTUVKA, 2001). – 2, Représentation ponctuelle de la distribution de *Bombus argillaceus* (Scopoli) (d'après SKORIKOV, 1931). – 3, Représentation ponctuelle sur grille d'échantillonnage de la distribution de *Lestica clypeata* (Schreber) (d'après LECLERCQ & BARBIER, 1993).

Toutes ces nouvelles disciplines constituent une consécration du rôle fondamental de la cartographie en systématique. Toutefois, tout ce développement a eu tendance à faire oublier les progrès de la science de base nécessaire à cet apport : la cartographie elle-même, et ses outils.

C'est sur ces progrès et les changements apportés par ceux-ci que nous allons nous pencher maintenant.

PROGRÈS DE LA CARTOGRAPHIE APPLIQUÉE À LA BIOGÉOGRAPHIE

On peut considérer que les données antérieures à Linné constituent une "préhistoire" de la systématique et on ne s'y intéressera pas davantage.

Première phase : "*patria*"

Les données les plus anciennes (18^e siècle et beaucoup de données du 19^e siècle) ne figurent pas de localités mais de simples indications continentales ou régionales. Les indications géographiques données dans les descriptions sont souvent introduites par le terme "*Patria*" ou "*Habitat in*"...

Ces données ne peuvent être figurées sur une carte que sous la forme d'une trame régionale ou continentale. Les étiquettes des collections zoologiques sont alors généralement laconiques. DARWIN (1958) lui-même confesse qu'il avait négligé de noter les îles de ses récoltes de Passeraux Geospizidae de l'archipel des Galapagos. Ce n'est que bien longtemps après son retour qu'il s'est rendu compte qu'il avait ainsi perdu de très précieuses indications, de haute valeur comme argument en faveur de sa nouvelle théorie de la transformation des espèces. En d'autres termes, la connaissance des provenances exactes de ses récoltes lui apparaissaient soudain nécessaires pour pouvoir argumenter sa théorie.

Le fait qu'un naturaliste aussi soigneux que Darwin ait négligé de noter les localités précises au début de sa carrière est symptomatique : cette indication était considérée alors comme inutile ou en tout cas comme d'intérêt très marginal.

C'est pourtant ce genre d'indications très approximatives qui a pu mener aux concepts fondateurs de biogéographie de WALLACE (1876). On a pu ainsi constater que beaucoup de grands groupes animaux ne peuvent être observés que dans certains continents. Malgré la précision très faible des indications de base, il ne faut pas négliger les apports de cette démarche simple.

Par ailleurs, la vision pragmatique et simpliste des distributions des naturalistes du 18^e siècle a imposé le concept d'unicité du phénomène vivant à l'échelle de la planète. Le fait qu'on pouvait indiquer dans la même clé indifféremment des espèces d'Europe ou d'Amérique a imposé l'universalité de la systématique.

Enfin, n'oublions pas que ces simples observations de distributions continentales, telle que Wallace les a décrites, ont donné une cohérence toute particulière à la théorie de la dérive des continents de WEGENER (1915), qui a révolutionné les sciences de la Terre.

Il reste qu'on est bien embêté, de nos jours, lorsqu'on découvre une nouvelle espèce en collection et que les seuls spécimens conservés ne mentionnent comme provenance que "*Gallia*", "*Amériques*", ou "*Terrae australibus*".

Deuxième phase : "*locus typicus*"

C'est durant la seconde moitié du 19^e siècle seulement que la nécessité de mentionner un "*locus typicus*" dans les descriptions s'est développée. A partir de cette époque, des noms de localités figurent presque toujours sur les étiquettes d'animaux de musée.

Même encore de nos jours, c'est le pointage de ces localités qui permet d'élaborer les cartes de distribution à l'échelle continentale.

L'exploitation de ces données historiques permet aussi de mesurer la dérive faunique, c'est-à-dire les variations à long terme de la distribution ou de l'abondance des espèces.

La précision de ces données est toutefois fort limitée. Beaucoup de localités sont devenues introuvables, surtout dans les pays à l'histoire tourmentée, comme les Balkans ou le Caucase. Des villages ont été rasés, se sont déplacés ou ont changé de nom plusieurs fois.

On perd aussi beaucoup de données à cause d'homonymies mal documentées : il y a des centaines de "Saint-Martin" en France et encore plus d'"Aleksandrovsk" en Russie.

L'aire qu'on associe à un nom de localité est très variable. Certaines localités sont petites et leur citation donne une indication précise. C'est le cas, par exemple, de la commune de Mont-Louis, dans les Pyrénées-Orientales, dont la superficie est de quelques hectares. D'autres sont extrêmement vastes et peuvent avoir une géographie tourmentée avec d'énormes disparités écologiques. A titre d'exemple, la localité de Calenzana (Corse) s'étend sur 183 km² et depuis le niveau de la mer jusque 2 148 m.

Du fait de ces limitations, même lorsqu'on a pu identifier une localité sans équivoque, la résolution spatiale espérée du fait de l'exploitation des citations de localités est limitée et variable. Dans la région ouest-paléarctique, cette résolution spatiale va d'un ordre de grandeur de 10 × 10 km² (Belgique, Pays-Bas) jusqu'à nettement plus de 100 × 100 km² dans les zones semi-désertiques d'Afrique du Nord ou du Proche-Orient. Ailleurs dans le monde, cette résolution peut encore chuter considérablement jusqu'à atteindre plusieurs centaines de km (déserts chauds ou polaires, jungles, océans).

Les premières cartes par points issues de listes de localités sont apparues dans la première moitié du 20^e siècle. Par exemple, SKORIKOV (1922) et REINIG (1939) ont publié de telles cartes.

On se contentait alors de pointer des localités d'observation sur des fonds de cartes muettes à très petite échelle. L'idée générale était alors simplement de représenter de manière objective l'entière de la distribution d'une espèce. On n'espérait pas retirer d'autre renseignement de la carte que cette simple représentation.

Les exigences étaient limitées et les moyens requis dérisoires : un dictionnaire postal ou un atlas doté d'un index, des fonds de carte d'usage scolaire, une plume à encre de chine et un simple pochoir pour figurer les cercles. Les imprécisions et approximations énormes étaient masquées par la très petite échelle des cartes et le diamètre des points figurés.

Troisième phase : l'enquête

Aux environs de la Deuxième Guerre Mondiale, alors que la "nouvelle systématique" prenait son essor, la nécessité de données précises et complètes est apparue. L'idée est alors née de constituer des cartes détaillées, avec une couverture spatiale basée sur des projections organisées et systématiques, avec un vaste réseau de collaborateurs.

Un des premiers exemples de taille est celui de l'Atlas de la Flore belge et luxembourgeoise (DELVOSALLE, 1954 ; ROMPAEY & DELVOSALLE, 1979). La mise sur pied d'une enquête aussi ambitieuse que celle de Rompaey & Delvosalle a immédiatement buté sur des problèmes cartographiques. Les cartes topographiques nécessaires étaient alors complètement contrôlées par l'armée (en Belgique, l'Institut Géographique Militaire). Les cartes n'étaient alors distillées qu'au compte-goutte et à la condition de présenter une autorisation émise par l'une ou l'autre instance officielle. Cette situation a perduré jusqu'aux années 70.

Il était aussi nécessaire de standardiser et simplifier au maximum les opérations à l'intérieur du réseau de collaborateurs constitué. Cette standardisation a poussé de manière très logique à l'emploi de coordonnées géographiques. Il s'agissait d'une grande nouveauté dans l'emploi de ces coordonnées. Il ne s'agissait plus ici de conduire des opérations militaires ou une navigation mais de repérer une flore ou une faune. Ces différences de but et de précision espérée ont mené les botanistes belges à proposer un travail dans une grille géographique. Leur méconnaissance des méthodes fondamentales de la cartographie et une volonté pragmatique les ont mené à cons-

tituer un système géographique *ad hoc* : le système IFBL (Institut de la Flore belgo-luxembourgeoise). La mauvaise construction fondamentale de ce système est encore maintenant un handicap des opérations de surveillance de la flore et de la faune de Belgique et du nord de la France. Il n'empêche : même imparfait, le système constitué alors a permis de porter la précision du travail à un niveau jamais atteint pour une projet de cette ampleur : 1 km.

L'idée de constituer de vastes réseaux de collaborateurs pour constituer des "atlas" géographiques de distribution d'organismes s'est alors développée et a culminé entre 1960 et 1990. Certains projets particulièrement ambitieux doivent être signalés : *l'Atlas of the British Flora* (PERRING & WALTERS, 1962), *Atlas Florae Europaeae* (JALAS & SUOMINEN, 1972-1991) et la Cartographie des Invertébrés Européens - European Invertebrate Survey - Erfassung der Europäischen Wirbellosen (HEATH & LECLERCQ, 1979) (fig. 4).

Comme pour la Belgique et le Luxembourg, ces vastes projets internationaux ont à nouveau buté sur les nécessités de standardiser les méthodes et tout particulièrement les coordonnées géographiques. Un système universel avait été mis au point par les alliés pour les opérations militaires de la Deuxième Guerre Mondiale : le système UTM¹. Porté par la réussite historique, ce système a donc été largement utilisé pour de très nombreuses enquêtes internationales ou nationales.

A l'origine de l'usage de l'UTM, on espérait que les cartes topographiques à quadrillage UTM seraient largement disponibles dans tous les pays. Hélas, dans la plupart des pays d'Europe, les instituts géographiques, toujours militaires, ne facilitèrent pas du tout la diffusion de ces documents.

Dans ces pays, on a dû se résoudre à un pis-aller terrible : quadriller empiriquement des cartes routières à large diffusion.

La précision géographique de ces cartes routières étant assez faible, la résolution spatiale du système n'a pas pu descendre en deçà du km, voire même souvent, de 10 km.

Petit à petit les Instituts géographiques nationaux se sont démilitarisés. Les cartes sont devenues plus facilement disponibles. Dans les années 80, il est devenu possible de travailler en France, en Belgique et dans la plus grande part de l'Europe Occidentale, avec une précision générale de 1 km. Toutefois, une telle précision restait encore largement inaccessible dans beaucoup de pays.

Le travail de surveillance dépendait encore largement alors de la disponibilité des cartes topographiques et de la qualité de celles-ci.

On peut objecter que la qualité des cartes topographiques était alors suffisante pour espérer une précision de repérage meilleure que 1 km. La pratique montre que cet objectif modeste du kilomètre était pourtant plus réaliste. Lorsqu'on dispose de cartes topographiques de haute résolution, 1/25 000^e ou 1/50 000^e, et qu'on s'est parfaitement orienté sur le terrain, on peut espérer une précision de 25 à 50 m. Pourtant, la plupart du temps, on utilise plutôt des cartes au 100 000^e ou au 250 000^e et on fait de fréquentes erreurs d'estimation. Ces erreurs cumulées restreignent la précision à un niveau réaliste de 1 km.

Cette période marquée par l'utilisation majeures de cartes comme source de base de l'information géographique a été extrêmement fructueuse d'un point de vue biogéographique. On a énormément travaillé.

En particulier, les années 80 ont été particulièrement riches de succès car on a fondé des organismes de surveillance de la faune et de la flore. Les premières bases de données ont d'abord été installées sur de gros *main-frames* ou sur des "mini-ordinateurs" (ces mots sont maintenant désuets). Vers la fin des années 80, les performances des micro-ordinateurs ont été telles qu'il a été possible de constituer d'innombrables "bas de laine" de données et de publier des centaines d'atlas.

¹ La signification des sigles est fournie en fin d'article.

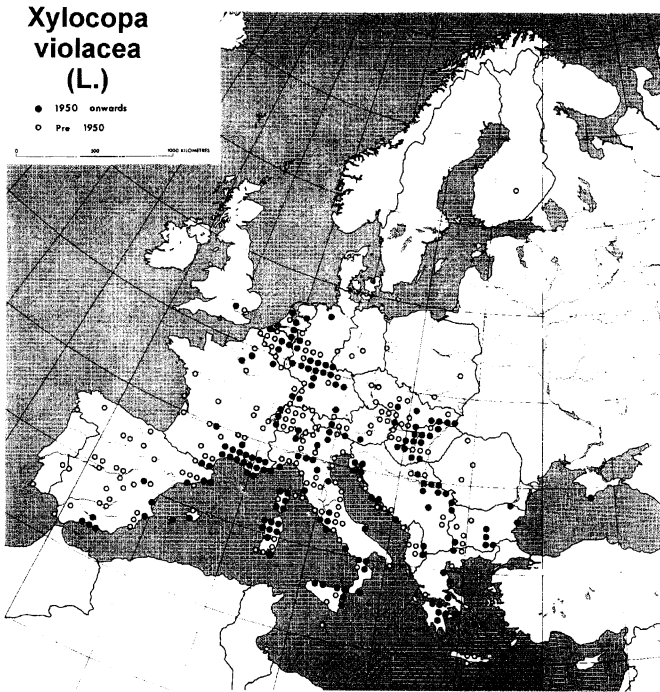


Fig. 4. – Le projet EIS-CIE-EEW : distribution de *Xylocopa violacea* (L.) (d'après Heath & Leclercq, 1979).

La "controverse UTM"

On doit dire un mot sur la "controverse UTM" qui a, un moment, agité les passions.

L'utilisation d'un système de coordonnées géographiques cartésiennes et métriques est particulièrement séduisant. Les opérations numériques sont grandement facilitées. Les changements d'échelle et de résolution sont triviaux. Les mailles ainsi définies sont aussi de taille constante ce qui rend particulièrement aisées les opérations d'écologie numérique : établissement et comparaison de densités de population, indices de diversités (entre autres). Ce sont d'ailleurs ces facilités de mesure et de calcul qui ont rendu ces coordonnées métriques indispensables pour les applications militaires.

Il existe des quantités de systèmes de projections planes qui permettent la construction d'un système de coordonnées métriques. En pratique, chaque pays a le sien. L'UTM a été un progrès majeur car, comme son nom l'indique, il est bâti pour être universel. Par ailleurs, les grands états-majors et les instituts géographiques nationaux se sont préoccupés de mettre au point des accords de standardisation des méthodes (OTAN, 1983).

C'est donc tout naturellement que les naturalistes impliqués dans les grandes enquêtes internationales ont choisi l'UTM comme système généralisé de coordonnées géographiques. Ce choix a posé beaucoup de problèmes du fait du manque de disponibilité des cartes indiquant le quadrillage UTM. Il a fallu faire des conversions, des bricolages. Au bout du compte, on a perdu du temps. On aurait fait guère moins précis et nettement plus rapide si on avait utilisé des coordonnées angulaires sphériques (degrés-minutes-secondes ou grades).

Ce constat désabusé a entraîné une controverse qui a animé chacune des réunions de naturalistes des années 80 (CARTAN, 1978 ; CRAWFORD, 1983). Ces discussions étaient fort souvent stériles du fait de la mauvaise connaissance de la plupart des intervenants en ce qui

concerne les notions de base de la cartographie. Il est difficile, vingt ans plus tard, de comprendre à quel point on a pu se disputer et ainsi perdre du temps et de l'énergie.

Et pourtant, le choix général d'UTM a été heuristique. Il a obligé les naturalistes à se préoccuper des notions les plus fondamentales de la cartographie : datums et projections. Il a imposé l'idée de la standardisation. Il a apporté à l'activité naturaliste des préoccupations de cartographie fine qu'elle n'avait pas auparavant.

Et surtout, il a porté vers notre discipline la nécessité de calculer. Dès lors que les surcharges UTM n'existent pas sur les cartes, dès lors que les accords de standardisation ont imposé des algorithmes de conversion entre les systèmes géodésiques nationaux, l'idée s'est progressivement imposée qu'on peut, qu'on doit calculer les coordonnées. C'est RASMONT *et al.* (1986) et RASMONT & ANDRÉ (1989) qui ont publié à l'usage des naturalistes les premiers programmes d'ordinateur qui permettent de tels calculs.

C'est évidemment la vulgarisation des moyens informatiques durant les années 80 qui a permis ces progrès. Les algorithmes de calcul ont été progressivement intégrés dans les logiciels de banques de données et la controverse s'est éteinte.

C'est ainsi que, à la fin des années 80, le monde naturaliste était prêt pour la révolution technologique la plus marquante de ce siècle : le GPS.

La grande révolution technologique : le GPS

C'est le 10 janvier 1991 que le GPS est entré dans la vie des naturalistes européens. Alors que commençaient les opérations militaires de la Guerre du Golfe, les journalistes dépêchés sur place montraient que chaque section, chaque véhicule était munis d'un petit instrument simple : un positionneur GPS.

La résolution spatiale de ce premier modèle de positionneur GPS grand public était médiocre. Il ne disposait que de 4 canaux et son algorithme de recherche de satellites discernait mal les situations défavorables. Il ne donnait aucun algorithme de transformation de coordonnées. Qu'importe, on a utilisé les logiciels précédemment mis au point pour les banques de données.

L'amélioration de précision apporté par le GPS était notable. On passait d'une précision générale de 1 km à une précision le plus souvent comprise entre 100 et 200 m, soit un gain de près d'un ordre de grandeur.

Ce premier positionneur GPS affranchissait aussi de trouver à tout prix des cartes. Il suffisait pour avoir des données fort fiables de se munir d'une quelconque carte routière et de cet instrument léger.

C'est dans les pays où la cartographie est médiocre, ou simplement peu accessible, que l'apport a été le plus significatif. Peu de gens savent que la récente exploration très fructueuse du Désert de Gobi à la recherche de dinosaures et de mammifères mésozoïques fossiles n'a été rendue possible que par l'usage du GPS. En absence totale de cartes, les équipes de paléontologues se sont munis de photos satellites et du GPS ce qui leur a permis, non seulement de prendre leurs repères géologiques mais aussi, tout simplement, de naviguer dans un désert vaste et particulièrement dépourvu de repères (MCKENNA, 1992).

La qualité des positionneurs s'est fort améliorée en une décennie et, à la fin du XX^e siècle, la précision espérée est arrivée à 100 m voire 30 m dans des conditions particulièrement favorables. En particulier, des découvertes mathématiques et de nouveaux algorithmes de recherche de satellites ont permis de profiter de la multiplication des canaux (HOFMAN-WELLENHOF *et al.*, 2001). Les positionneurs modernes ont tous 12 canaux, ils disposent tous de moyens étendus de conversions de coordonnées, de communication avec les ordinateurs, de cartes intégrées et d'une banque de points de référence.

Toutefois, durant les années 90, la résolution spatiale des coordonnées est restée assez basse : guère meilleure que celle de la navigation traditionnelle au moyen d'une boussole,

d'un sextant et d'un chronomètre. Quand à l'altitude, elle n'était qu'à peine mesurable par ce moyen et un bon altimètre recalé régulièrement est resté indispensable jusque récemment.

La raison de cette basse résolution était que la fréquence GPS accessible au public (dite "S/A code") faisait l'objet d'une altération volontaire et aléatoire du signal (dit "dithering"). Ainsi, l'armée américaine s'assurait le monopole des coordonnées de précision (dite "Y-code") accessibles par le seul biais d'un code secret (RASMONT, 1997, HOFMAN-WELLENHOF *et al.*, 2001).

Le Département de la Défense des Etats-Unis a maintenu le "dithering", notamment en arguant que la précision obtenue était suffisante pour les applications de navigation classique. On pensait alors généralement que le gain possible en retirant le "dithering" n'apporterait qu'une amélioration assez faible de la résolution : 10-30 m.

Durant ce temps, le système russe homologue, baptisé de l'acronyme GLONASS est devenu actif, avec une précision comparable au GPS.

Une nouvelle révolution passée inaperçue!

Après de longues discussions houleuses et des luttes d'influences diverses, le Président des Etats-Unis, William Clinton, annonça le 1^{er} mai 2000 que le "dithering" était retiré. Avec pour restriction, toutefois, que les USA se réservent le droit de le réactiver à tous moments si la situation stratégique le réclame.

Les usagers du GPS ont alors découvert avec stupéfaction que la résolution des positionneurs a fait un bond plus grand que prévu. Celle-ci atteint maintenant, au pire des cas 15 m et, lorsque tout va bien, 3 à 4 m.

On a ainsi gagné 2 ordres de grandeur de précision par rapport aux premiers positionneurs disponibles en 1991 ; près de 3 ordres de grandeur par rapport à la précision opérationnelles de nos banques de données de la fin des années 80 ; près de 4 ordres de grandeur par rapport aux objectifs de la Cartographie des Invertébrés Européens!

Quant à l'altitude, sa précision a fait les mêmes gains. Alors qu'un bon altimètre était resté le meilleur moyen de mesurer l'altitude jusqu'en 2000, avec une résolution de 20-100 m, la précision du GPS est devenue nettement meilleure puisqu'elle varie maintenant entre 3 et 15 m.

Il est possible de gagner un ordre de grandeur supplémentaire de précision en adoptant le DGPS (Differential Global Positioning System), au prix d'une certaine complication d'emploi et d'un coût accru.

Enfin, au cours de l'année 2002, on a commencé à trouver des positionneurs qui, en plus du système GPS ou GLONASS, prennent en compte le système EGNOS-WAAS. Ce dernier consiste en 19 satellites géostationnaires qui calculent et transmettent en temps réel certaines corrections au GPS ou au GLONASS (HOFMAN-WELLENHOF *et al.*, 2001).

L'ensemble des systèmes GPS, GLONASS, EGNOS, WAAS et DGPS constitue ce qu'on appelle GNSS.

Certains instrument combinent l'accès à plusieurs systèmes GNSS : GPS, GLONASS, DGPS et EGNOS, pour permettre des précisions décimétriques mais au prix d'un coût et d'un encombrement incompatibles avec les activités entomologiques.

Par contre, pour un prix modique, grâce à la combinaison des seuls GPS et EGNOS, un petit positionneur de poche de moins de 200 g peut maintenant donner des coordonnées d'une précision métrique!

Qu'apporte la précision?

Les conséquences des sauts de précision successifs pour les écologistes en général et pour les systématiens en particulier sont multiples.

Les premiers sauts de précisions (passage de "*patria*" à "*locus typicus*", citation des localités) ont eu des avantages tellement évidents en systématique qu'il est inutile d'y revenir.

Tableau I. – Possibilités d'exploitation des données en fonction de leur résolution spatiale.

Résolution spatiale	Outil de repérage	Usage en biogéographie	Usage en systématique	Usage en écologie	Usage en conservation de la nature
Pays	étiquettes " <i>Patria</i> "	nul	faune continentale	nul	nul
Localités	étiquettes de localités	cartes de distribution nationales	- faune nationale; - types distribution; - centres dispersion; - refuges	faible	régression ou expansion d'espèces
50 km	cartes continentales	<i>idem</i>	<i>idem</i>	<i>idem</i>	<i>idem</i>
10 km	cartes nationales ou régionales	cartes de distribution régionales, analyses multivariée	caractérisation des espèces et sspp.	analyses multivariées des préférences générales des spp. et sspp.	<i>idem</i>
1 km	cartes locales	cartes régionales détaillées	<i>idem</i>	<i>idem</i>	surveillances des grandes réserves naturelles, ZNIEFF
100 m	GPS avec <i>dithering</i>	utilisation de SIG	étude des relations entre populations (inter-dêmes)	superposition aux cartes topographiques, zonation détaillée des paysages, densité de population approximative, indices de diversité	aménagement du territoire, études d'incidences de vastes ensembles; zonation grossière NATURA 2000
1-3 m	GPS sans <i>dithering</i> ou GLONAS, avec DGPS ou EGNOS-WAAS	utilisation de SIG avec interpolation, extrapolation, ajustement aux modèles topographiques	structure interne des populations (intra-dêmes) et métapopulations; suivi des individus	superposition aux photos aériennes, éthologie; densité de population précise par marquage-recapture; écologie de la nidification; socio-biologie	études d'incidence de petits espaces protégés, rues, jardin, mares; zonation fine NATURA 2000

Disons simplement que sans ces progrès, la théorie de l'évolution elle-même n'aurait pas pu voir le jour, ou alors beaucoup plus laborieusement. C'est ce que DARWIN (1958) lui-même, nous a appris.

La confection des cartes détaillées à l'échelle continentale a permis de raffiner considérablement la connaissance de la variabilité des espèces, en permettant une délimitation précise des phénomènes de variations géographiques. On a aussi commencé à s'interroger sérieusement sur le processus même de la spéciation (sous-espèces et espèces).

La confection de cartes détaillées à l'échelle nationale ou régionale a permis de s'interroger sur le destin des espèces, sur les zones de diversité ou de pauvreté. On a pu aussi détecter si des espèces sont en expansion ou en régression. Ces cartes ont été et sont encore l'outil de base de la conservation des espèces (LECLERCQ, 1979; LECLERCQ *et al.*, 1980).

Les cartes détaillées à l'échelle subrégionale, locale, voire sub-locale, sont des instruments de gestion du territoire, de conservation des espaces naturels. Cela est bien connu et ressortit plus de l'écologie que de la systématique. Mais aussi, la connaissance fine des habitudes et des choix des populations, voire des individus, permet de détecter des espèces jumelles ou cryptiques, de repérer les structures populationnelles ou méta-populationnelles. Pour ces travaux, la précision décimétrique apportée par les derniers perfectionnements du GPS sont requis.

En Belgique, à titre d'exemple, la densité de population et l'intrication géographique des utilisations du sol ne permettent pas de créer de vastes réserves naturelles. Les surfaces de celles-ci se comptent parfois en hectares mais le plus souvent en ares. Le travail de surveillance de ce réseau d'espaces protégés requiert, bien évidemment, l'usage d'instruments à haute précision. On peut prévoir que l'emploi des positionneurs GNSS se généralisera rapidement. Si beaucoup d'espèces animales sont fort mobiles et sont capables de déplacements considérables, la plupart sont extrêmement casanières. Même des insectes au vol puissant et rapide, comme

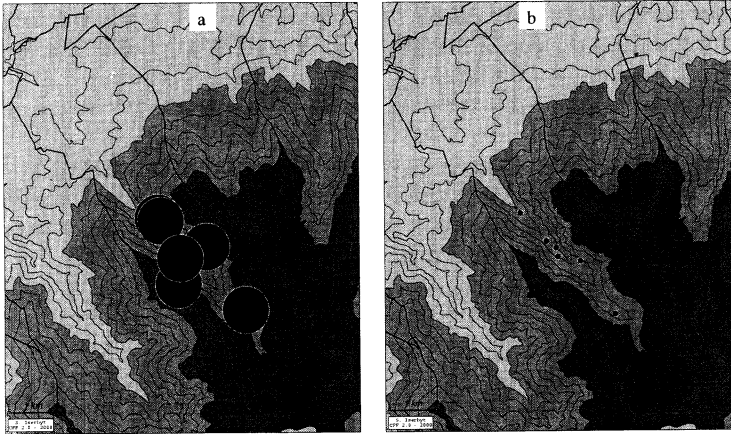


Fig. 5. – Distribution de *Bombus gerstaeckeri* Morawitz dans la vallée d'Eyne (France, Pyrénées-Orientales).
– a, Résolution de 1000 m. – b, Résolution de 100 m (d'après ISERBYT, 2000).

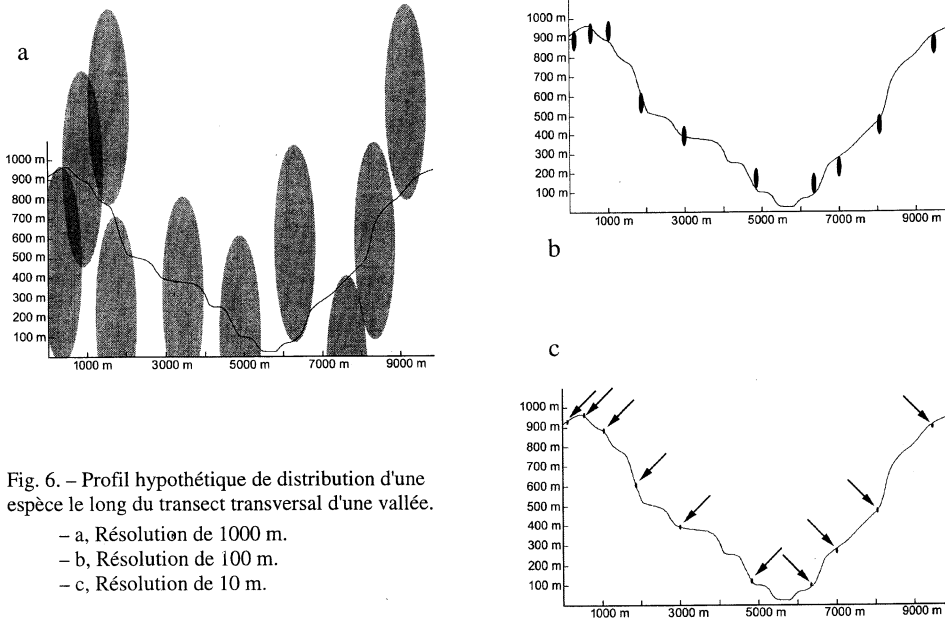


Fig. 6. – Profil hypothétique de distribution d'une espèce le long du transect transversal d'une vallée.
– a, Résolution de 1000 m.
– b, Résolution de 100 m.
– c, Résolution de 10 m.

les bourdons, se cantonnent semble-t-il dans une zone de butinage qui ne dépasse guère 50 m (PONCHAU, 2002). Ici aussi, seule la précision apportée par le GNSS de dernière génération permet le repérage exact des populations.

Ces progrès sont récapitulés dans le tableau I.

Les sauts récents de précision modifient considérablement les possibilités de couplage entre les informations fauniques elles-mêmes et les informations géographiques existantes. A titre d'exemple, avec une résolution de 10 km, il est impossible d'associer la distribution des observations avec celle des courbes de niveau. Même la résolution de 1 km ne permet que difficilement cette mise en relation (fig. 5 a, b).

La résolution de 100 m, généralisable seulement avec le GPS, permet enfin l'appariement des données fauniques et du modèle topographique de relief. C'est pour les données d'altitude que le gain est le plus net (fig. 6 a, b, c).

Une résolution décimétrique rend cette relation suffisamment précise pour espérer des analyses détaillées des effets de pente, de versant ou de micro-relief.

Cet exemple de connexion entre les données topo-fauniques et topographiques est évident, trivial. Il faut toutefois garder en tête que les mêmes progrès vont permettre d'associer les données topo-fauniques avec la floristique, la phytosociologie, la géologie, la micro-climatologie, bref, avec tous les facteurs topographiés.

Il n'est pas encore possible d'imaginer les conséquences de cette révolution technologique sur nos méthodes et sur nos concepts. Ce progrès va obliger les naturalistes à bien intégrer les notions de base de la cartographie et même de la topographie. Il n'est plus possible que les naturalistes de terrain continuent de travailler sans comprendre, par exemple, ce qu'est un ellipsoïde, un datum, une projection. Cette ignorance des concepts de base de la cartographie a déjà entraîné trop de palabres et de retards.

Nous pensons, pour notre part, que, au prix de cette initiation, le progrès apporté va considérablement modifier notre perception des écosystèmes et des taxons qui les peuplent.

Autant la cladistique a été une révolution intellectuelle de l'étude de la phylogénie, autant l'immixtion de la topographie parmi nos méthodes de terrain va modifier notre compréhension des espèces et des populations.

Deux siècles après Humboldt, après avoir connu la biogéographie, nous assistons à la naissance d'une nouvelle discipline : la biotopographie.

AUTEURS CITÉS

- CARTAN M., 1978. – *Inventaire et cartographie de répartitions d'espèces*. Faune et Flore. CNRS, Paris, 127 + XIX p.
- CRAWFORD R.L., 1983. – Grid systems for recording specimen collection localities in North America. *Systematic Zoology*, 32, 389-402.
- DARWIN C., 1958. – *The autobiography of Charles Darwin*. Nora Barlow, London [traduction : *Darwin : l'autobiographie d'un naturaliste de l'époque victorienne*, ed. Belin, Paris, 1985].
- DEEMING J.C., 1979. – Map mania. *Antenna, London*, 3(1) : 9.
- DELVOSALLE L., 1954. – Où en sont les cartes floristiques I.F.B. – fin 1953. *Bulletin de la Société Royale de Botanique de Belgique*, 87 : 121.
- DOBZHANSKY T. 1937. – *Genetics and the origin of Species*. Columbia University Press, New York, 1ère édition.
- HEATH J., 1971. – *Instructions for recorders*. European Invertebrate Survey - Cartographie des Invertébrés européens. Erfassung der europäischen Wirbellosen, Monks Wood Experimental Station, Huntingdon, 23 p. (disponible en français).
- HEATH J., & LECLERCQ J., 1979. – *Provisional Atlas of The Invertebrates of Europe*. Maps 1-27. Monks Wood Experimental station, Faculté des Sciences agronomiques de l'Etat, Abbots Ripton, Gembloux, 27 cartes.
- HENNIG W., 1950. – *Grundzüge einer Theorie der phylogenetischen Systematik*. Deutscher Zentralverlag, Berlin, 370 p.
- 1966. – *Phylogenetic Systematics*. University of Illinois Press, Urbana, Chicago, London, 263 p.
- HOFMANN-WELLENHOF B., LICHTENEGGER H. & COLLINS J., 2001. – *GPS. Theory and practice*. Fifth edition. Springer, 382 p.
- HUXLEY J., 1940. – *The new Systematics*. Oxford University Press, Oxford.
- ISERBYT S., 2000. – *Ecologie des bourdons (Hymenoptera, Apidae) de la commune d'Eyne (Pyrénées-Orientales, France)*. Mémoire de fin d'étude, Université de Mons-Hainaut, Mons, 97 p, 1 pl.
- JALAS S. & SUOMINEN J. (eds), 1972-1991. – *Atlas Florae Europaeae. Distribution of vascular plant in Europe*, 1-9, The Committee for Mapping the Flora of Europe, Helsinki.

- LASTUVKA Z. & LASTUVKA A., 2001. – *The Sesiiidae of Europe (Lepidoptera)*. Apollo Books, Stenstrup, 245 p.
- LECLERCQ J., 1983. – Succès, mais aussi obstacles épistémologiques rencontrés dans la « Cartographie des Invertébrés européens ». *Bulletin de la Société entomologique de France*, **88** : 81-97.
- 1979. – Tous ces atlas, toutes ces cartes, c'est pour quoi faire? *Notes fauniques de Gembloux*, **2** : 1-22.
- LECLERCQ J. & BARBIER Y., 1993. – Atlas de répartition des Crabroniens de France et des régions limitrophes (Hymenoptera, Sphecidae, Crabronini). *Notes fauniques de Gembloux*, **27** : 1-94.
- LECLERCQ J., GASPARD C., MARCHAL J.-L., VERSTRAETEN C. & WONVILLE C., 1980. – Analyse des 1600 premières cartes de l'Atlas provisoire des Insectes de Belgique, et première liste rouge d'Insectes menacés dans la faune belge. *Notes fauniques de Gembloux*, **4** : 1-104.
- LEGENDRE L. & LEGENDRE P., 1984. – *Ecologie numérique*. Masson, Presses de l'Université du Québec, Paris, Québec, t. I : 260 p., t. II : 335 p.
- MAYR E. 1963. – *Animal species and evolution*. Belknap Press of Harvard University, Cambridge Massachusetts [Traduction : *Populations, espèces et évolution*. Ed. Hermann, Paris, 1974].
- MCKENNA P.C., 1992. – GPS in the Gobi: Dinosaurs among the Dunes. *GPS World*, **3** (6), 20-26.
- OTAN, 1983. – *Accord de standardisation. Objet : Systèmes géodésiques, ellipsoïdes, quadrillages et systèmes de coordonnées rectangulaires*. STANAG 2211, édition 4, Bureau militaire de standardisation, sans classification.
- PONCHAU O., 2002. – *Structure de la population de Bombus gerstaeckeri Morawitz (Hymenoptera, Apidae) de la vallée d'Eyne (France, Pyrénées-Orientales)*. Mémoire de fin d'étude, Université de Mons-Hainaut, Mons, 57 p., 3 planches.
- RASMONT P., 1997 (1996). – L'utilisation des balises satellites pour les opérations de surveillance biologiques : une révolution!, p. 86-94, in: Maurin H., Guilbot R., Lhonoré J., Chabrol L. & Sibert J.-M., *Inventaire et cartographie des invertébrés comme contribution à la gestion des milieux naturels français*. Muséum national d'Histoire naturelle, Paris, 252 p.
- RASMONT P. & ANDRÉ J., 1989. – Applications d'un logiciel de projection U.T.M. à la surveillance des Invertébrés. In: Beaufort J. de & Maurin H., *L'utilisation des Inventaires informatisés d'Invertébrés pour l'Identification et la Surveillance d'Espaces de grand Intérêt faunistique*, Paris, Secrétariat de la Faune et de la Flore.
- RASMONT P., SPEIGHT M.C.D. & PICTON B.E., 1986. – A computer programme for conversion of the Irish Transverse Mercator Projection to the Universal Transverse Mercator Projection. *The Irish naturalist's Journal*, **22** (2) : 45-50.
- REINIG W.F., 1939. – Die Evolutionsmechanismen, erläutert an den Hummeln. *Zoologischer Anzeiger*, Suppl. **12** : 170-206.
- ROMPAEY E. VAN & DELVOSALLE L., 1979. – *Atlas de la flore belge et luxembourgeoise. Ptéridophytes et Spermatophytes*. 2^e édition. Jardin botanique National, Meise, 1542 cartes.
- SKORIKOV A.S., 1922. – Fauna Petrogradskoj gubernii. T. II, vyts. 11. Shmeli Petrogradskoj gubernii. [Faunae Petropolitanae catalogus]. *Petr. agron. Inst. sci. Res., ent. Sta.*, **2** : 1-51.
- 1931. – Die Hummelfauna Turkestans und ihre Beziehungen zur zentralasiatischen Fauna (Hymenoptera, Bombidae). *Abhandlungen der Pamir-Expedition*, 1928, **8** : 175-247.
- SOKAL R.R. & SNEATH P.H.A., 1963. – *Principles of numerical taxonomy*. W.H. Freeman, San Francisco, 16 + 359 p.
- VOGT O., 1909. – Studien über das Artproblem. 1. Mitteilung. Über das Variieren der Hummeln. I. Teil. *Schriften der berlinischen Gesellschaft Naturforschender, Freunde, Berlin*, **1909** : 28-84, 1 planche.
- 1911. – Studien über das Artproblem. 2. Mitteilung. Über das Variieren der Hummeln. 2. Teil (Schluss). *Schriften der berlinischen Gesellschaft Naturforschender, Freunde, Berlin*, **1911** : 31-74.
- WALLACE A.R., 1876. – *Geographical distribution of animals*. London.
- WEGENER A., 1915. – *Die Entstehung des Kontinenten und Ozeane*. Vieweg & Sohn, Braunschweig, [traduction : *La genèse des continents et des océans*. Christian Bourgeois éditeur, Paris, 262 p., 1990.]

Lexique – acronymes

DGPS : *Differential Global Positioning System*. Système de calcul des positions GNSS par comparaison avec une station de référence au sol (voir GNSS, GPS). Ce système nécessite un signal radio supplémentaire.

- Dithering*: de l'anglais «*to dither*», hésiter. Désigne le processus d'altération volontaire de la précision du signal GPS afin de restreindre ses utilisations à des fins civiles.
- EGNOS: *European Geostationary Navigation Overlay Service*. Constellation européenne de satellites destinés à calculer les facteurs de correction des GNSS, système compatible avec WAAS.
- EIS-CIE-EEW: *European Invertebrate Survey* – Cartographie des Invertébrés Européens – *Erfassung der Europäischen Wirbellosen*. Association qui s'est donné pour but de confectionner et mettre à jour les cartes de distribution des invertébrés d'Europe.
- GLONASS: *GLObal NAVigation Satellite System*. GNSS développé par le gouvernement de la Fédération de Russie.
- GNSS: *Global Navigation Satellite System*. Système de navigation basé sur une constellation de satellites.
- GPS: *Global Positioning System*. GNSS développé par le Département de la Défense des Etats-Unis
- IFBL: Institut Floristique Belgo-Luxembourgeois. Association qui s'est donné pour but de confectionner et mettre à jour les cartes de distribution des plantes. *Compte rendu des plantes de Belgique et du Luxembourg*.
- OTAN: Organisation du Traité de l'Atlantique Nord.
- SIG: Système d'Information Géographique. Logiciel destiné à interpréter graphiquement les banques de données carto- ou topographiques.
- UTM: Universel Transverse de Mercator. Système de projection plane applicable à l'ensemble du monde. Le système UTM fait l'objet de conventions internationales de standardisation.
- WAAS: *Wide Area Augmentation System*. Constellation américaine de satellites destinés à calculer les facteurs de correction des GNSS, système compatible avec EGNOS.
- ZNIEFF: Zone Naturelle d'Intérêt Ecologique Faunistique et Floristique
-