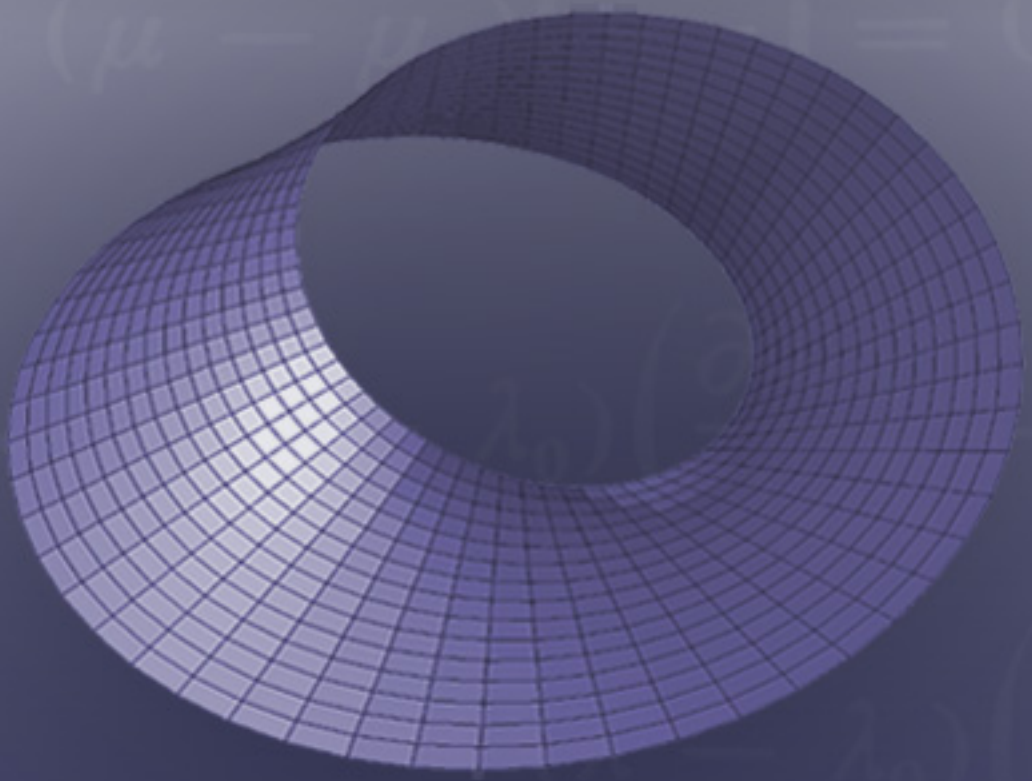
Analyse des relations entre variables météorologiques et flux de population: application au criquet migrateur malgache [Orthoptéres Madagascar]



Les Cahiers de l'Analyse des données
Vol. IV - 1979 - n° 1 - p. 95-106

ANALYSE DES RELATIONS ENTRE VARIABLES MÉTÉOROLOGIQUES ET FLUX DE POPULATION : APPLICATION AU CRIQUET MIGRATEUR MALGACHE [ORTHOPTÈRES MADAGASCAR]

par M. Meimaris (1)

Les liens entre phénomènes biologiques et écologiques sont bien connus. Ainsi, dans le présent article consacré au déterminisme des déplacements des populations solitaires du criquet migrateur malgache, on étudie les relations entre les variables météorologiques et l'évolution des populations. La méthodologie ainsi mise au point présente un cadre général ; en particulier la définition de types de temps par l'analyse des données météorologiques a déjà reçu plusieurs applications (cf. I. Papadimitriou ; Thèse 3° cycle (et article à paraître) et la construction d'un tableau de contingence croisant des variables de deux types relatives aux mêmes individus, mais mesurées suivant des rythmes temporels différents a été appliquée par M. Hariri dans sa thèse à un problème fort éloigné du nôtre : l'essai de chaussures en laboratoire et au porter (cf article à paraître).

1 *Problème biologique et données disponibles*

Etudiant les caractères de dépendance du criquet migrateur malgache vis-à-vis de son milieu, Launois (1974) a montré que deux facteurs écologiques essentiels pouvaient limiter l'expansion de l'espèce : le facteur héliothermique et le facteur sécheresse, éléments fondamentaux des contrastes saisonniers.

L'optimum thermique de développement et de croissance du criquet migrateur correspond à un intervalle de températures moyennes, mesurées sous abri, à l'intérieur duquel l'acridien a le maximum de chances de satisfaire toutes les formes de son activité et de sa reproduction. Il est réalisé à partir de 25° de température moyenne. La limite supérieure n'intervient pas dans les conditions naturelles de l'île de Madagascar.

L'optimum pluviométrique se situe très généralement entre 50 et 100 mm d'eau par mois. C'est dire que le criquet migrateur est un acridien typiquement méso-hygrophile par rapport à l'ensemble des milieux représentés dans son aire d'habitat.

Pendant toute la saison chaude l'optimum thermique est presque toujours réalisé. Le facteur hydrique devient alors le facteur écologique le plus important. L'évolution spatio-temporelle de la zone pluviométriquement favorable (intervalle entre les isoyètes (i.e. courbes de niveau de de la pluviométrie) mensuels 50 et 100 mm) permet alors de rendre compte des modifications de la situation acridienne et en particulier de suivre les déplacements des ailés solitaires. On note en effet une coïncidence entre la localisation des densités maximales d'imagos (insectes complètement développés, par opposition aux larves) et la situation de la bande pluviométrique 50-100 mm, c'est-à-dire celle où l'insecte a la plus forte probabilité de rencontrer des conditions microclimatiques adéquates (figure 1).

(1) Docteur 3° cycle (E.S.E.I.P. - Grèce)

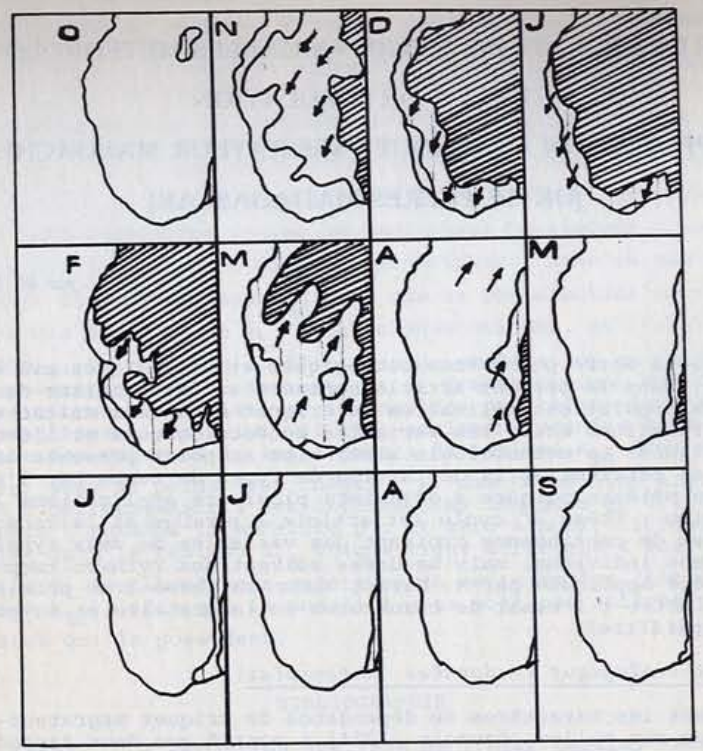


Figure 1 : Evolution pluviométrique mensuelle sur le Sud-Ouest de Madagascar (moyennes de 1931 à 1955, d'après Ravet, 1958) et sens général du déplacement des ailés solitaires (d'après Launois, 1974)

Pluviométrie mensuelle : < 50 mm
50 à 100 mm
> 100 mm
Sens du déplacement des ailés solitaires →

(d'après M. Lecoq, 1975)

Le problème était de vérifier dans quelle mesure la théorie de l'optimum écologique au niveau local (sur les deux stations d'études de Betindria et Anandemby) rend compte de l'évolution acridienne et plus spécialement des phénomènes de déplacements des populations solitaires ;notamment les corrélations suceptibles d'exister entre les déplacements d'ailés solitaires et les différents facteurs météorologiques.

La base de cette étude nous a été fournie par Monsieur M. Lecoq . D'un ensemble de données recueillies pendant deux années sur les stations acridiennes de la plaine de Lavanono à Madagascar (Lecoq ; 1975), nous avons considéré plus particulièrement :

Des données biologiques (évolution des populations acridiennes) concernant une suite I d'intervalles de temps i (d'inégale durée : de 1 à 7 jours) au seuil et au terme desquels on a effectué des observations permettant de calculer les variables suivantes :

- La densité d'émergences (e), c'est-à-dire le nombre de jeunes adultes par hectare, ayant effectué leur mue imaginale sur la station au cours de l'intervalle i.

- La densité d'apports (a), c'est-à-dire le nombre d'imagos allochtones (i.e. nées ailleurs) arrivant sur la station, par hectare, au cours de l'intervalle i. On distingue deux types d'apports : apports stationnels (as) et apports interstationnels (ai) :

Apports stationnels : ce sont seulement de petits mouvements locaux. Les insectes proviennent des stations voisines situées au maximum à 5 ou 6 Km.

Apports interstationnels : ils résultent de mouvements de grande amplitude. Les insectes peuvent venir de plusieurs dizaines ou centaines de Km.

- La densité des pertes d'imagos (p), c'est-à-dire le nombre d'imagos disparaissant de la station, par hectare,au cours de l'intervalle i (effet cumulé de la mortalité et de l'émigration).

- La densité d'imagos par hectare au terme de l'intervalle i.

Notons que les trois premières variables étant des nombres d'individus comptés sur un hectare pendant une période de temps il est naturel de les convertir en densité spatiotemporelle en les divisant par la longueur de la période i considérée ; ce que nous avons fait :

Des données météorologiques qui sont :

- Les précipitations journalières en mm d'eau

- La température de l'air sous grand abri à 180 cm du sol

- La vitesse du vent (par heure) à 6 m du sol

- La direction du vent à 6 m du sol également

- L'humidité relative de l'air, sous grand abri à 180 cm du sol.

Pour les quatre dernières mesures, les enregistrements sont des enregistrements horaires, alors que pour la première, ils sont journaliers. Dans l'analyse rapportée ici au § 3, on considérera seulement la température et l'humidité.

2 Méthodologie statistique

Pour mettre en évidence des relations entre la météorologie et l'évolution des populations acridiennes, compte-tenu des fréquences d'enregistrement différentes de ces deux types de données on a effectué tout d'abord une recherche de type de temps, puis on a caractérisé chaque période d'observations biologiques par le profil des types de temps qui s'y rencontrent. D'où deux étapes principales.

1) Classification hiérarchique des jours par rapport aux variables météorologiques considérées ; et troncature de cette hiérarchie à un niveau jugé significatif pour obtenir les *types de temps*.

2) A partir du tableau décrivant les périodes d'observations biologiques à la fois par la démographie du criquet et la séquence des types de temps, élaboration et analyse d'un tableau de contingence dont les colonnes sont les types de temps et les lignes sont des classes de variables biologiques ; avec à la croisée de la ligne b et de la colonne c le nombre total de jours qui relèvent du type de temps c et appartiennent

à un intervalle d'observation i où les mouvements de population correspondent à la modalité biologique b.

Il importe de noter que le tableau de contingence ainsi construit est conforme au principe d'équivalence distributionnelle en ce sens que, si l'on fusionne deux périodes consécutives i et i' au cours desquelles le profil des types de temps étaient les mêmes, ainsi que les variables biologiques, le tableau de contingence obtenu en définitive ne change pas. Ainsi est résolu le problème du croisement de variables formant deux groupes (ici météorologie et biologie ; plus exactement flux de populations) relevées suivant des rythmes différents voire irréguliers (pour les comptages d'individus).

Plus précisément on a un ensemble de calculs dont l'organisation apparaît sur la figure 2 : nous croyons utile de commenter en détail cette figure afin d'aider les lecteurs qui désireraient traiter sur ordinateur des problèmes analogues aux nôtres.

A) Traitement des données météorologiques ; en deux étapes a et b :

a) Découpage en classes des variables météorologiques par le programme STEAK pour rendre homogène ces variables. En effet on dispose de plusieurs types de variables biologiques : température, humidité, vitesse et direction du vent, pluviométrie, qui sont de nature très différente. Cette première étape a été baptisée CLATEM (classes de temps).

b) Classification : A l'issue de l'étape précédente on a un fichier "METEO" sur disque auquel on applique le programme de classification ascendante hiérarchique avec une distance de chi-deux et agglomération par le moment d'ordre 2. Cette étape est appelée TYPTEM (Types de Temps) . Éventuellement on peut effectuer d'abord une analyse factorielle puis appliquer le programme de classification aux jours chacun décrits par les valeurs des premiers facteurs issus de l'analyse). On fait perforer sur cartes la description complète de la hiérarchie (par aînés-benjamins et niveaux)

B) Prétraitement de variables biologiques :

Les classes des différentes variables biologiques sont caractérisées à l'aide des histogrammes de ces variables, le tableau brut est alors transformé en tableau de classes de valeurs. (Cette étape a été baptisée CLABIO). Un fichier est créé sur disque.

C) Troncature de la hiérarchie des jours (cf A) et fusion des deux types de données (météorologiques et biologiques)

On décide de façon empirique du niveau de la coupure du dendogramme décrivant la hiérarchie. Les différentes classes provenant d'une telle coupure sont ensuite examinées et interprétées le mieux possible ; pour cela on peut utiliser conjointement les contributions issues de l'analyse factorielle ainsi que les contributions des variables aux différentes classes de la hiérarchie. En fait comme on le verra au § 3, c'est seulement au terme des analyses que l'on peut arrêter définitivement le nombre des types de temps. Ici, on retient un nombre modéré de types de temps susceptible d'être réduit ultérieurement. Cette étape, ainsi que la fusion de deux types de données sont effectuées par un programme spécialement construit appelé COUPE.

D) A partir d'un fichier TABBAS sur disque, on édifie le tableau de contingence a analyser (TABFIN), constitué par les nombres de jours de type de temps c pendant les périodes i rentrant dans la classe biologique.

L'analyse factorielle de ce dernier tableau nous informe des liaisons qui peuvent exister entre les diverses variables biologiques et la météorologie.

Bien entendu, chaque étape de ce processus (figure 2) est susceptible de fournir des résultats intermédiaires, utiles par eux-mêmes (comme on le verra dans l'exemple d'application).

3 *Exemple d'application*

3.1 *Des données au tableau de contingence*

Le processus de calcul proposé, a été suivi à titre d'expérience pour le traitement des données portant sur la saison chaude du mois de Décembre 1971 au mois d'Avril 1972.

Comme données météorologiques, la température et l'humidité sont ici seules retenues (on ne disposait d'ailleurs ni de la force, ni de la direction du vent pour cette période).

Chaque jour de la saison déjà citée, est alors décrit par la séquence des 48 mesures concernant la température et l'humidité horaires. Le programme CLATEM (STEAK) effectue le découpage en classes et les différentes mesures météorologiques sont alors transformées en classes de valeurs ; de plus ce programme effectue le dédoublement des colonnes de ce tableau de façon à ne pas privilégier les fortes températures ou la forte humidité.

Les données biologiques, comme nous l'avons déjà dit sont relatives à des périodes de temps (allant d'un jour à une semaine) caractérisées par la densité à l'hectare d'émergences, d'apports et de pertes d'imagos. La densité d'imagos à l'hectare (le dernier jour de la période, est aussi considéré.

Après avoir examiné l'histogramme de chacune de ces variables biologiques on a retenu trois classes pour chacune des variables représentant les émergences, les apports et les pertes et cinq classes pour la densité. Deux classes sont aussi distinguées suivant le caractère stationnel ou interstationnel des apports

On a alors sur disque le tableau BIOLO des classes de valeurs, ainsi construit. Il est évident que l'analyse factorielle de ce tableau fournit des indications sur les relations entre les variables biologiques : nous n'en dirons rien ici.

A l'aide du programme TYPTEM (CAH) on obtient le dendogramme visualisant la classification ascendante hiérarchique des jours suivant leurs température et humidité (figure 3). L'arbre apparaît formé de deux branches secondaires : il nous a donc paru raisonnable de former une partition des jours en six classes (toujours sur la période considérée).

Le programme COUPE réalise cette partition à partir de la hiérarchie fournie par TYPTEM et effectue la fusion de deux types de données dans le tableau TABBAS.

Chaque ligne de ce tableau décrit une période biologique par ses paramètres démographiques suivis de six valeurs représentant le nombre de jours correspondants à chaque type de temps durant la période considérée (figure 2).

Ici encore, on a la possibilité de faire l'analyse factorielle de ce tableau en mettant en éléments supplémentaires, soit les variables biologiques, soit les types de temps.

A l'aide de TABBAS (sur disque), le tableau de contingence à analyser (TABFIN) est facilement construit. Celui-ci comporte :

- Les classes des valeurs des différentes variables biologiques en lignes (16 lignes) ;

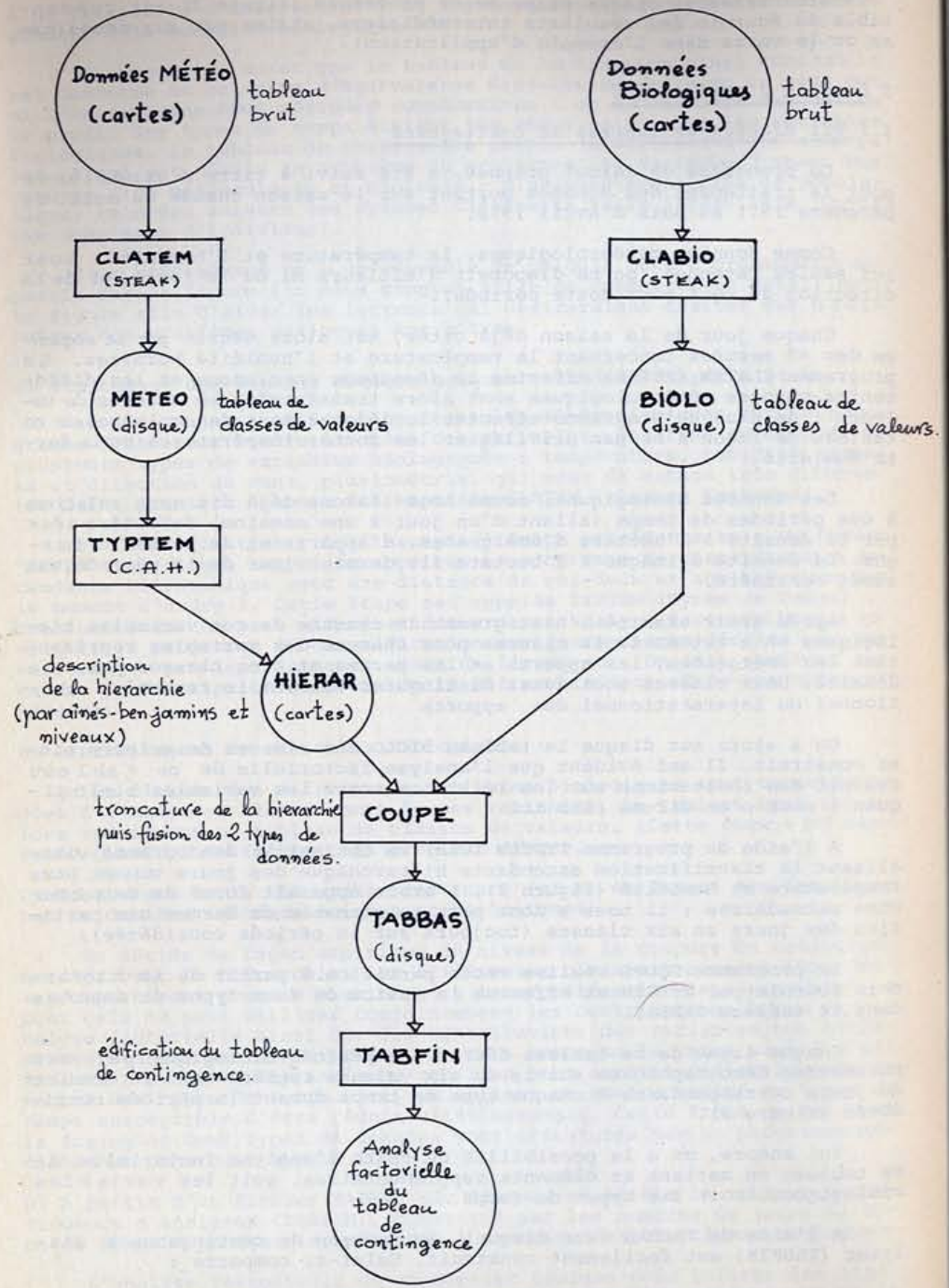
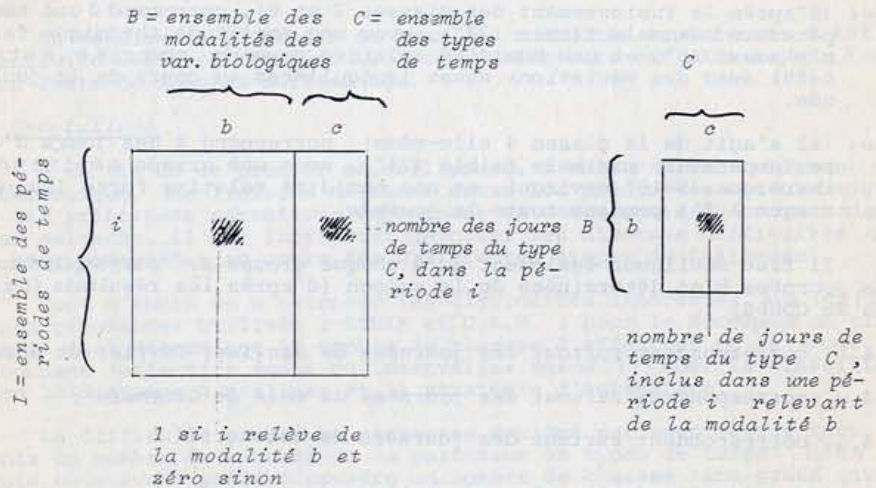


Figure 2 : Suite des calculs effectués.

- Les six types de temps distingués, en colonnes, K(i,j) étant toujours une somme de jours, ainsi qu'il a été dit précédemment.

De plus on a mis en colonnes supplémentaires les périodes décrites par des vecteurs booléens représentant les classes de variables biologiques.



3.2 *Prévision des types de temps d'après leurs relations avec les migrations*

Le plan des deux premiers axes extraits de l'analyse factorielle de notre tableau, nous reconstitue 90,2 % de la dispersion (inertie) des points réels (figure 4).

Les classes de temps 1, 5 et 3 d'une part (point ω_1), 2 et 6 (point ω_2) de l'autre, sont respectivement confondues sur ce plan de projection.

Cette disposition nous a amené à faire une étude approfondie des jours qui sont contenus dans chacune de ces classes : on a examiné les courbes décrivant l'évolution horaire de la température et de l'humidité des différentes journées ; ce faisant, avec le concours du biologiste évidemment, et en tenant compte des résultats de l'analyse factorielle du tableau METEO (figure 5) on arrive à regrouper effectivement les six classes en trois grandes parties, dont chacune reconstitue une branche de la hiérarchie originelle (figure 3).

En portant sur le graphique d'analyse factorielle (figure 5) les numéros des classes au lieu des dates des jours, on constate en effet un chevauchement des numéros 2 et 6 d'une part et des numéros 1, 3 et 5 d'autre part. Seuls les numéros 4 sont bien isolés. (En fait la séparation des 6 classes n'apparaît qu'en considérant des facteurs de rang supérieur à 2).

Ces trois classes, après avoir été interprétées constituent nos *types de temps* :

- ω_1 (produit du fusionnement des classes 1, 5 et 3), correspond à des journées d'une température maximale élevée (= 8-10°) au cours de la journée, et une humidité relative faible, (45%).

- ω_2 (d'après le fusionnement des classes 2 et 6), correspond à une température maximale faible (28°), avec une amplitude thermique faible aussi (5°) et une humidité relative moyenne, comprise entre 0-80% avec des variations assez irrégulières au cours de la journée.

- ω_3 (il s'agit de la classe 4 elle-même), correspond à des jours d'une température maximale faible (28°), avec une grande amplitude thermique (9-10° environ), et une humidité relative forte (supérieure à 75% pendant toute la journée)

Il faut souligner également qu'à chaque groupe ω_i correspondent des journées bien déterminées de la saison (d'après les résultats fournis de COUPE) :

- à ω_1 correspondent surtout des journées de Janvier, Février et Mars ;

- à ω_2 correspondent surtout des journées du mois de Décembre ;

- à ω_3 correspondent surtout des journées de Mai-Avril.

3.3 *Interprétation de l'analyse du tableau de contingence*

Tout au long du premier axe factoriel (τ_1 = 49,4%)λ_1 = 0,14) ces différents types de temps semblent ordonnés suivant l'amplitude thermique des journées qui les forment (ω_1, ω_2, ω_3) (figure 4).

Le deuxième facteur (τ_2 = 40,8%, λ_2= 0,11) oppose ces types de temps suivant les valeurs absolues de la température et de l'humudité (ω_1 , ω_2)

Sur notre plan de projection (figure 4), on remarque que les fortes classes de départs (pertes, p_3) coïncident avec les fortes densités (d_5) et les émergences nombreuses (l_5) (cela est évident : plus les émergences sont nombreuses, plus la densité est élevée et plus les départs s'il y en a) peuvent être nombreux).

On note également une liaison de ces fortes valeurs de densité, émergences et départs , avec les apports et plus particulièrement les apports stationnels (as) ; c'est également logique : plus la densité est élevée, plus les petits mouvements locaux de populations seront denses (à densité forte).

Par contre, il n'y a pas de liaison avec les apports interstationnels (ai) lesquels, résultant des mouvements de grande amplitude, ne dépendent alors pas de la densité locale.

Ces fortes valeurs des variables biologiques ne sont pas liées aux fortes valeurs de la température (ω_1). Elles correspondent en fait à des journées avec une température maximale faible (optimum aux alentours de 28°) d'une grande amplitude thermique au cours de la journée humidité élevée (ω_3).

Une humidité basse, au cours de la journée, semble défavoriser les émergences nombreuses (ω_1 étant corrélé avec la plus faible des classes d'émergence, e_1).

En somme, nos résultats sont conformes avec ceux formulés par M. Lecoq à la page 126 de sa thèse : "Grossièrement on peut considérer la zone encadrée par les valeurs suivantes comme la plus favorable à l'activité locomotrice :

25° C, 70% d'humidité

35° C, 40% d'humidité

En dessous de 23 degrés et pour des humidités supérieures à 80% , l'activité est très réduite. La limite inférieure est plus sujette à caution faute de données suffisantes.

4 *Conclusions*

A la fin de ce premier dépouillement, à valeur essentiellement méthodologique, des liaisons existant entre les phénomènes météorologiques et les principaux paramètres concernant la démographie du criquet migrateur malgache, il est instructif de citer les diverses difficultés qui se sont présentées au cours des différentes étapes du traitement.

Tout d'abord on a retrouvé les difficultés inhérentes aux différents programmes utilisés : STEAK et C.A.H. ; pour le découpage en classes il faut déterminer le nombre de classes à effectuer et le mode de découpage (effectifs égaux ou intervalles égaux ?) ; pour la classification la distance à utiliser et la stratégie d'agrégation.

La difficulté propre au processus employé par nous réside dans le choix du nombre de classes de la partition en types de temps. Dans le doute nous avons préféré prendre un nombre de classes trop grand quitte à devoir par la suite en regrouper certaines.

En effet, la mise en évidence de divers types de temps est en principe effectuée, après avoir examiné et comparé, pour plusieurs jours, les courbes décrivant l'évolution horaire des diverses variables météorologiques : lorsque que le nombre de ces variables est élevé (comme c'est le cas ici, avec cinq variables météorologiques mesurées par enregistrements horaires), l'interprétation devient très lourde, voire impossible.

De plus les types de temps étant créés suivant tous les facteurs météorologiques à la fois, l'influence prépondérante d'un seul phénomène ou de la combinaison de ceux-ci pourrait nous échapper.

Reste à ajouter que, les données biologiques étant insuffisamment précises, il n'est pas utile de chercher une classification trop fine et une interprétation trop fouillée pour les données météorologiques, ce qui nous a conduit à réviser en cours d'interprétation le nombre des types de temps choisis.

BILIOGRAPHIE

LAUNOIS M. 1974 : Influence du facteur pluviométrique sur l'évolution saisonnière du criquet migrateur *Locusta migratoria capito* (Sauss) en phase solitaire et sur sa grégarisation à Madagascar. Thèse de doct. d'état, univ. PARIS XI-ORSAY

LECOQ M. 1972 : Contribution à l'étude des déplacements des populations imaginales de *Locusta migratoria capito* (Sauss) dans la nature. Ann ; Zool . Ecol. animale, INRA ; n° hors série 225-262.

LECOQ M. 1975 : Les déplacements par vol du criquet migrateur malgache en phase solitaire. Leur importance sur la dynamique des populations et la grégarisation. Thèse de doctorat d'état. Univ. PARIS XI-ORSAY.

MEIMARIS M. 1976 : Thèse de doctorat de 3° cycle. Université P.& M. Curie

HARIRI M. 1978 : Thèse de doctorat de 3° cycle. Université P.& M. Curie

PAPADIMITRIOU Y. 1978 : Thèse de doctorat de 3° cycle. Univ. P. & M. Curie

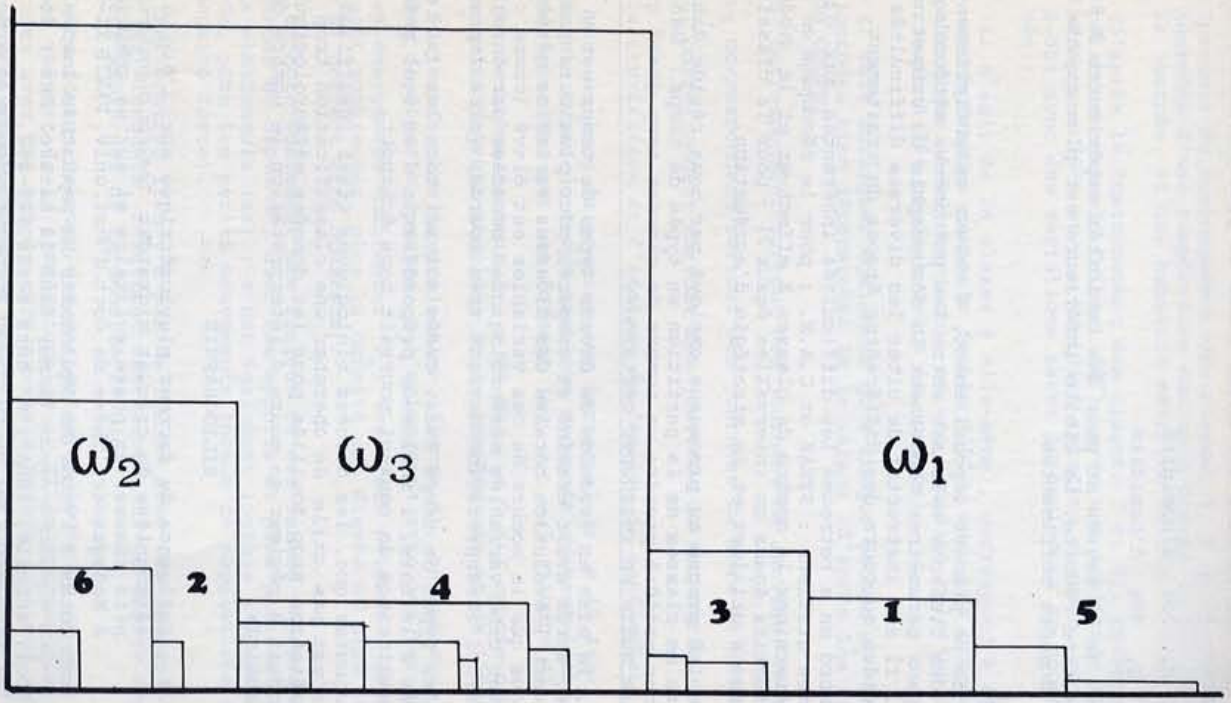
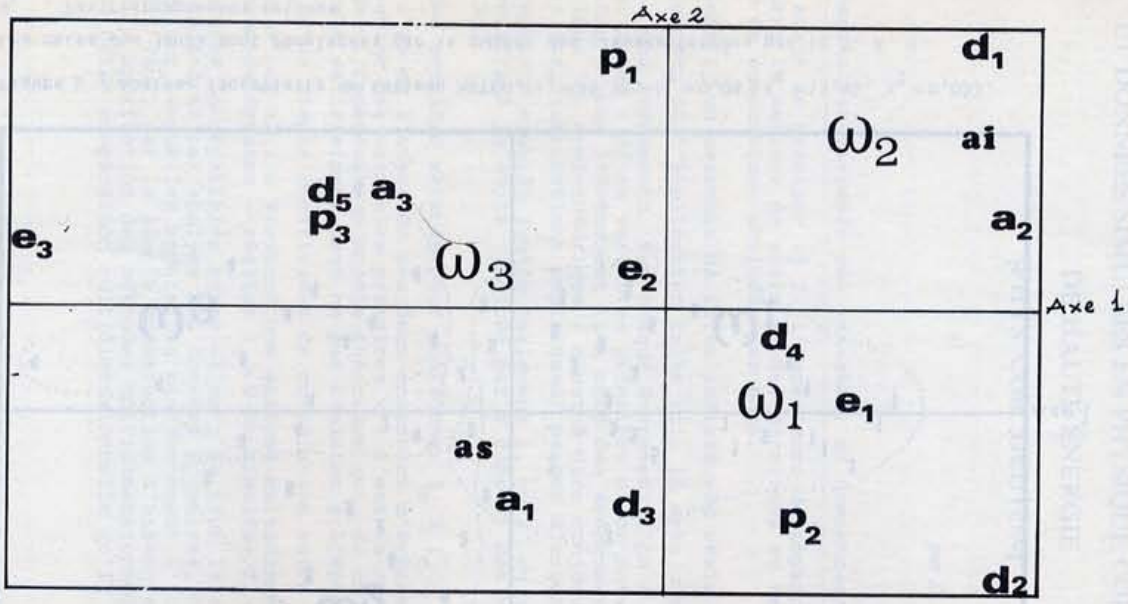


Figure 3 . Classification Ascendante Hiérarchique des jours suivant leurs température et humidité horaires. (Distance de χ^2). Six classes sont distinguées premièrement et regroupées en trois (ω_i) d'après les résultats d'analyses factorielles (cf. texte).



e: émergences ; **a** : apports ; **p**: pertes ; **d**: densité ; **ω**:types de temps

as :Caractère d'apport stationnel ; **ai** : Caractère d'apport inter-stationnel.

(1, 2, 3,... : Classes de valeurs croissantes pour les divers phénomènes biologiques.

Figure 4 . Liaisons entre évenements biologiques et principaux types de temps.Plan 1X2 ($\tau_1+\tau_2$=90,2%).

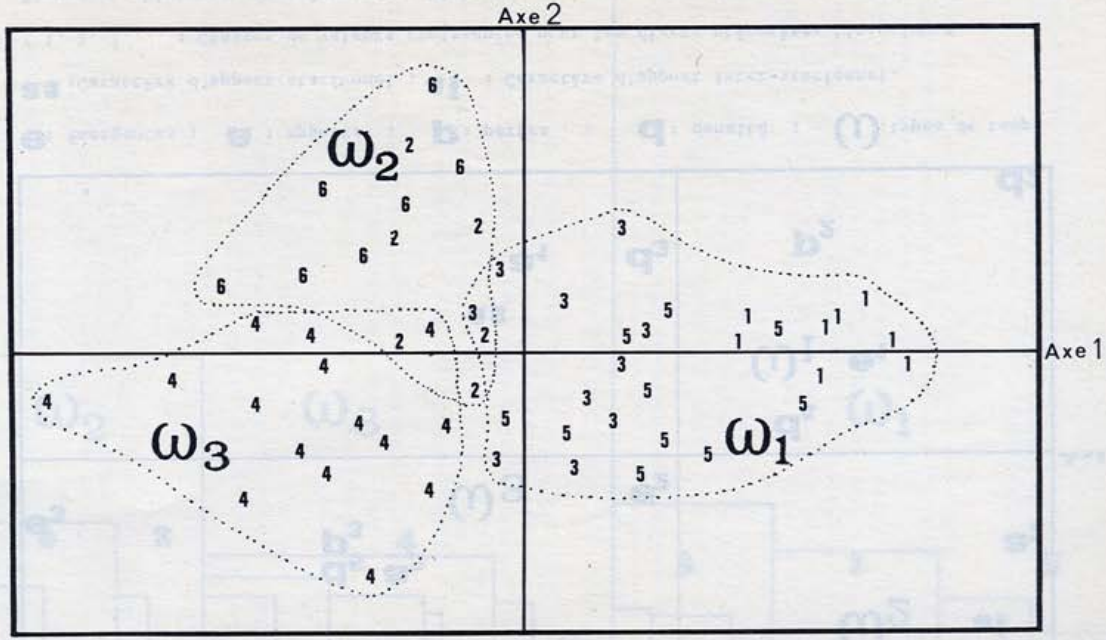


Figure 5 . Analyse factorielle du tableau METEO. ($\tau_1 = 36,2\%$, $\lambda_1 = 0,08$; $\tau_2 = 15,4\%$, $\lambda_2 = 0,03$).

Les dates des jours sont remplacées par le numéro des classes formées par le C. A. H.

ω_i , les regroupements retenus.