

## AUTOMATISATION D'UN MODELE ECOLOGIQUE ORIGINAL PROPRE A *OEDALEUS SENEGALENSIS* (KRAUSS, 1877) (ORTHOPTERA, ACRIDIDAE)

M. ARNAUD (\*), F. FOREST (\*\*), M. LAUNOIS (\*\*\*)

**RÉSUMÉ** — Le modèle bio-écologique original propre à *Oedaleus senegalensis* (KRAUSS, 1877), acridien de la zone soudano-sahélienne d'Afrique de l'Ouest, est fondé sur l'utilisation d'une table de correspondance entre une description simplifiée des facteurs discriminants de l'environnement et les réponses les plus probables de l'espèce à chacun de ses états biologiques. La conversion du modèle manuel en modèle automatique est rendue possible grâce à l'emploi du langage informatique et d'un ordinateur. L'originalité de la démarche adoptée, les utilisations possibles du modèle automatisé en protection des cultures vivrières et industrielles tropicales et les améliorations envisageables, sont discutées.

**Mots-clé** : Acridiens, Sahel, *Oedaleus senegalensis*, dynamique de population, modèle écologique, informatique, automatisation.

### INTRODUCTION

Le Criquet sénégalais, *Oedaleus senegalensis* (KRAUSS, 1877) (figure n° 1) est l'un des acridiens les plus dangereux du Sahel. Il appartient, selon la dénomination de PASQUIER (FAO 1967), au groupe des «sauteriaux», terme désignant les espèces faiblement grégaris. *O. senegalensis* s'attaque surtout aux jeunes plantules et aux épis à l'état laiteux des céréales cultivées : mil et sorgho. Le problème chronique qu'il pose (POPOV 1975) entre dans le cadre de la défense rapprochée des cultures. Chaque année, les dégâts sont habituellement constatés en des points dispersés de l'aire de distribution de cet insecte.

En 1974, les pullulations de sauteriaux en général et de *O. senegalensis* en particulier, se sont exceptionnellement généralisées. Des recherches biologiques et écologiques approfondies sur les espèces acridiennes économiquement dangereuses ont alors été entreprises en zone sahélienne (Niger) et en zone soudanienne (Haute-Volta) dans le cadre du Programme de Recherches Interdisciplinaire Français sur les Acridiens du Sahel (PRIFAS) (1975-1981), créé par le Groupement d'Etudes et de Recherches pour le Développement de l'Agronomie Tropicale (GERDAT) et le Fonds d'Aide et de Coopération (FAC) de la République Française.

*Oedaleus senegalensis* a fait l'objet de plusieurs études dans un passé récent (MALLAMAIRE 1948, CHOPARD

1950, JOYCE 1952, DAVEY, DESCAMPS et DEMANGE 1959, SARAIVA 1962, BATHIA et AHLUWALIA 1966, JAGO 1968, BATTEN 1969, HERGERT 1975). Ces observations, et les données complémentaires obtenues dans le cadre du PRIFAS (LAUNOIS-LUONG 1978, 1979 a et b, LAUNOIS et LAUNOIS-LUONG 1977, DURANTON, LAUNOIS, LAUNOIS-LUONG et LECOQ 1978, LAUNOIS 1978 a, 1979, LECOQ 1978 a, b, c) ont permis la mise au point d'un modèle écologique spécifique rendant compte de la dynamique spatio-temporelle des populations à l'échelle de l'ensemble de son aire d'habitat en Afrique de l'Ouest. Les fondements biologiques de ce modèle ont été exposés en détail dans une publication antérieure (LAUNOIS, 1978 a). Bien que ce modèle se situe en dehors des sentiers classiques de la modélisation mathématique, son exploitation peut être considérablement améliorée par l'utilisation des moyens informatiques modernes. Le langage informatique utilisé est le FORTRAN et les traitements ont été effectués sur l'ordinateur IBM 360-65 du Centre Inter-Universitaire de Traitement de l'Information de Montpellier (CITIM).

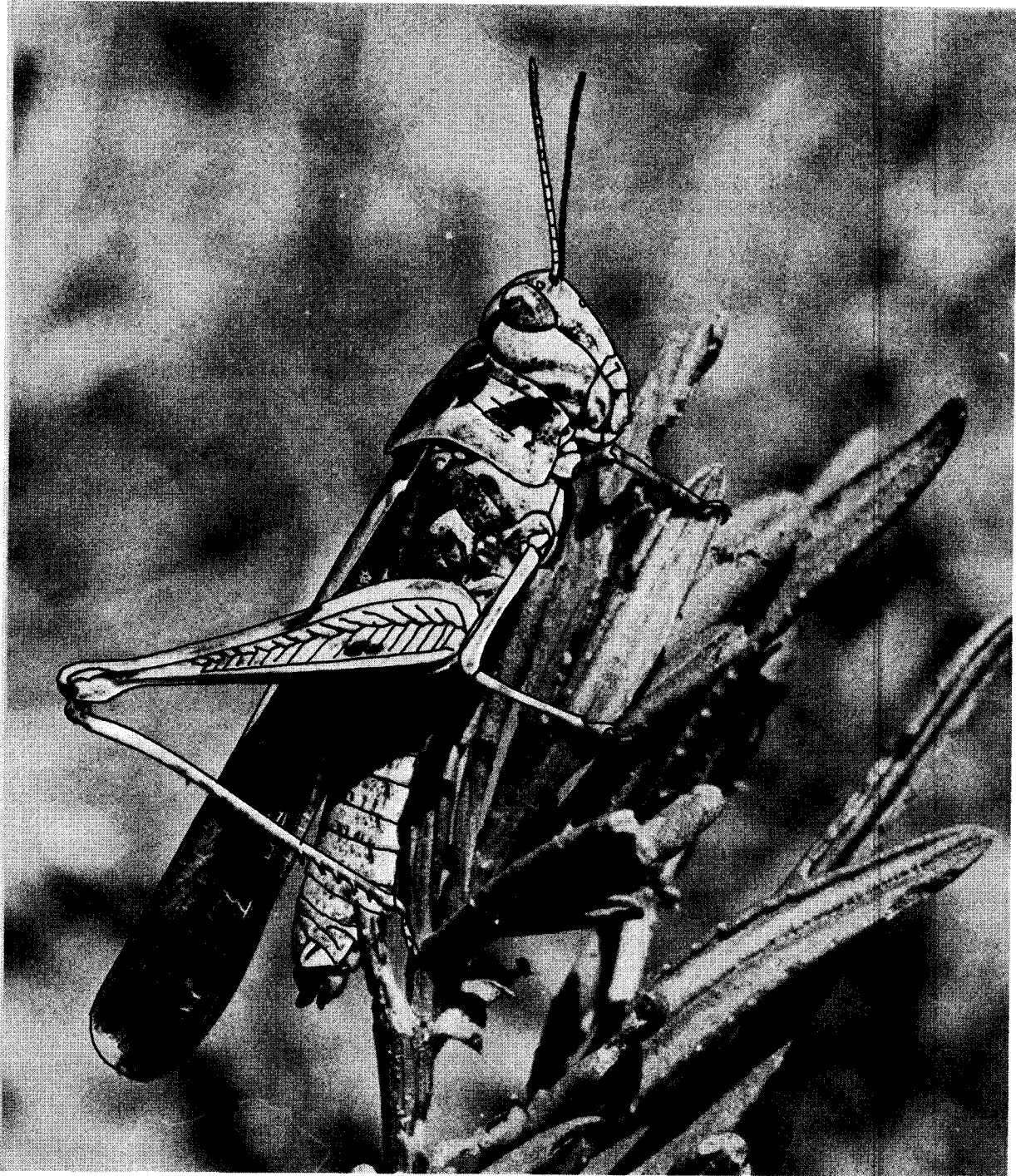
Outre l'originalité du modèle de base, nous traiterons surtout des modalités d'automatisation de son exploitation ouvrant des perspectives nouvelles dans plusieurs domaines d'application, bien que des améliorations soient encore envisageables. Le texte est rédigé pour des agronomes; il laisse volontairement dans l'ombre les aspects techniques de programmation.

Groupement d'Etudes et de Recherches pour le Développement de l'Agronomie Tropicale, G.E.R.D.A.T. - BP 5035 - 34032 Montpellier-Cedex.

\* ARNAUD (M.), Statisticien-informaticien I.R.A.T.

\*\* FOREST (F.), Agro-climatologiste I.R.A.T. (I.R.A.T. Institut de Recherches Agronomiques Tropicales et des Cultures Vivrières)

\*\*\* LAUNOIS (M.), Eco-entomologiste P.R.I.F.A.S. (P.R.I.F.A.S. Programme de Recherches Interdisciplinaire Français sur les Acridiens du Sahel.)



CI. LAUNOIS

Figure 1. Imago femelle de *Oedaleus senegalensis*

## ORIGINALITE DU MODELE

### CONCEPTION

L'utilisation de modèles empiriques pour décrire la réalité selon un schéma simplifié est bien antérieure à la prise de conscience de ce concept et à son utilisation méthodologique systématique (LEGAY, 1973). L'effort récent de modélisation en temps qu'instrument d'étude de la réalité doit beaucoup aux mathématiques conventionnelles (CHASE, LEGAY et PAVE 1977) et aux nouvelles méthodes d'analyse polyfactorielle des données. La grande majorité des modèles proposés en biologie est conçue sur la base d'ajustements mathématiques plus ou moins complexes pour décrire les grands phénomènes de développement et de croissance, soit par des fonctions continues (LEGAY, 1973, LEBRETON, 1973), soit par des fonctions interrompues par des changements brusques d'état se rattachant à la théorie des catastrophes de THOM (1977).

Souvent, les modèles en biologie font appel à des équations mathématiques de complexité croissante sans rapport avec la simplicité persistante des hypothèses de travail. Les meilleurs modèles ont été obtenus dans les situations les plus simples, comme les élevages en conditions monotones. Il est fréquent de constater que l'application d'un modèle mathématique à une situation nouvelle requiert la transformation des équations d'ajustement par des facteurs de correction. En se plaçant sur le plan biologique, on est surpris par le caractère généralement très fragmentaire ou schématique des hypothèses servant de point de départ aux compilations mathématiques. Si la concertation entre biologistes et mathématiciens n'a pas toujours été aussi féconde qu'elle aurait pu l'être, c'est peut-être faute d'un langage commun. Sans nier que l'introduction d'équations mathématiques complexes ait apporté une impulsion nouvelle à la définition des problèmes biologiques et écologiques, d'autres voies sont praticables pour mener à une modélisation opérationnelle.

Le modèle proposé pour décrire les principales étapes de la vie d'un acridien au Sahel repose sur la connaissance des réponses instantanées de l'insecte en présence d'un environnement très instable dont la signification globale est connue. Ce principe a déjà été mis en application pour l'étude d'un autre acridien : le Criquet migrateur *Locusta migratoria* (LINNÉ) à Madagascar et en Afrique (LAUNOIS 1974 a, b, LECOQ 1974).

L'établissement des tables de correspondance entre un type d'environnement et les capacités de réponse d'un organisme, suppose connus :

- la possibilité de regrouper tous les environnements possibles en classes d'environnement-types,
- la description des environnements-types selon les facteurs déterminants pour l'espèce (ou des combinaisons de facteurs),

- le choix d'un pas de temps adapté aux réponses des populations de l'organisme en fonction de la précision des mesures sur l'environnement et sur l'environné,

- la mise au point d'indices d'appréciation de l'effet des types d'environnement retenus,

- la connaissance des réponses de l'organisme dans tous les types d'environnement écologiquement significatifs.

La construction du modèle nécessite donc à la fois une très bonne connaissance de l'organisme et de son environnement, et un choix judicieux de la précision des mesures.

### MISE EN FORME

Le cycle biologique normal annuel d'*O. senegalensis* en Afrique de l'Ouest est caractérisé par trois générations successives en saison des pluies et par une diapause embryonnaire intercalée en saison sèche. En général, les trois générations n'apparaissent pas dans les mêmes régions, elles s'étagent du sud au nord de l'aire de distribution de l'espèce en fonction des mouvements saisonniers du Front Inter-Tropical (FIT).

Chaque année, il se produit des mouvements réguliers d'ailés du sud vers le nord en début de saison des pluies puis du nord vers le sud en fin de saison des pluies, ce qui explique que des générations successives s'individualisent dans des aires différentes dont les contours géographiques varient d'une année à l'autre en fonction des aléas climatiques. Dans une localité donnée, on peut observer des arrivées et des départs d'ailés. Ces populations migrantes se superposent aux populations autochtones. La dynamique locale des populations devient alors très complexe par suite de la coexistence de cohortes d'individus ayant diverses origines. De plus, les différents états biologiques réagissent immédiatement à leur environnement en modifiant leurs caractéristiques de développement, de survie ou de déplacement, dans la limite de leur adaptabilité biologique.

Un effort de rationalisation du stock d'informations anciennes et récentes dont les sources ont déjà été signalées, a permis de cerner assez précisément les différents types de réponses d'*O. senegalensis* mis en présence de situations écologiques variées à la méso-échelle. L'idée de mettre en correspondance une description sommaire du milieu avec les réponses les plus probables de chaque état ou stade biologique de l'acridien est à la base de la construction du modèle. La matérialisation de celui-ci réside dans deux tables complémentaires :

- la première établit les rapports codifiés entre 34 classes d'environnement supposées rendre compte de tous les types d'environnement que peut rencontrer habituellement l'acridien, et les effets de ceux-ci sur les états embryonnaire, larvaire et imaginal, d'après des critères

de vitesse de développement, de survie et d'aptitude au déplacement (tableau I),

— la seconde permet la conversion des indices de développement en nombre de jours réels pour les différents états et stades biologiques (tableau II).

La description simplifiée de l'environnement a été rendue possible grâce à la recherche des facteurs limitants permettant de qualifier un milieu donné de favorable ou de défavorable à l'espèce. Quatre facteurs principaux sont retenus :

Tableau I

TABLE DE CORRESPONDANCE ENTRE LES FACTEURS ECOLOGIQUES QUI AGISSENT SUR *O. SENEGALENSIS* ET LES INDICES DE VITESSE DE DEVELOPPEMENT, DE SURVIE, DE REUSSITE, D'ARRIVEE ET DE DEPART

Facteurs Désignation	Facteurs écologiques				Etats,	Acridien : <i>O. senegalensis</i>										
	F1 DJ	F2 Tm	F3 k	F4 V		Oeufs			Larves			Imagos				
						V	S	IR	V	S	IR	V	S	IR	IA	ID
1	>12	< 22°5	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	>12	< 22°5	0,01	0		0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	>12	< 22°5	0,10	1		0	3	0	0	1	0	0	1	0	0	0
4	>12	22°5	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
5	>12	22°5	0,01	0		0	3	0	0	1	0	0	1	0	0	1
6	>12	22°5	0,10	1		1	3	3	1	1	1	1	1	1	1	0
7	>12	25°	0	0		1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	2
8	>12	25°	0,01	1		1	3	3	1	1	1	1	1	1	0	2
9	>12	25°	0,10	2		2	4	8	2	2	4	2	2	4	2	0
10	>12	25°	0,20	2		3	4	12	2	2	4	2	2	4	2	0
11	>12	25°	0,50	3		3	1	3	2	1	2	2	1	2	0	3
12	>12	25°	1,00	3		3	0	0	2	1	2	2	1	2	0	3
13	>12	> 27°5	0	0		4	0	0	3	0	0	3	0	0	0	5
14	>12	> 27°5	0,01	1		4	3	12	4	1	4	4	1	4	0	5
15	>12	> 27°5	0,10	3		5	4	20	5	4	20	5	4	20	5	0
16	>12	> 27°5	0,20	4		5	4	20	5	4	20	5	4	20	5	0
17	>12	> 27°5	0,50	4		5	1	5	5	2	10	5	1	5	0	3
18	>12	> 27°5	1,00	5		4	0	0	5	1	5	5	0	0	0	5
19	<12	< 22°5	0	0	0+		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	<12	< 22°5	0,01	0	0+		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	<12	< 22°5	0,10	1	0+		0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
22	<12	22°5	0	0	0+		0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
23	<12	22°5	0,01	0	0+		0	0	0	1	0	0	1	0	0	1
24	<12	22°5	0,10	1	0+		0	0	1	1	1	1	1	1	1	0
25	<12	25°	0	0	0+	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	2
26	<12	25°	0,01	1	0+	1	3	3	1	1	1	1	1	1	0	2
27	<12	25°	0,10	2	0+	2	4	6	2	2	4	2	2	4	2	0
28	<12	25°	0,20	2	0+	3	4	12	2	2	4	2	2	4	2	0
29	<12	25°	0,50	3	0+	3	1	3	2	1	2	2	1	2	0	3
30	<12	25°	1,00	3	0+	3	0	0	2	1	2	2	1	2	0	3
31	<12	27°5	0	0	0+	4	0	0	3	0	0	3	0	0	0	5
32	<12	27°5	0,01	1	0+	4	3	12	4	1	4	4	1	4	0	5
33	<12	27°5	0,10	2	0+	5	4	20	5	4	20	5	4	20	5	0
34	<12	27°5	0,20	3	0+	5	4	20	5	4	20	5	4	20	5	0
					(1)	(2)			(3)							

(1) d'octobre à décembre

(2) de janvier à mars

(3) sous réserve que des éclosions aient pu se produire

F1 : facteur photopériodique

DJ : durée du jour en heures

F2 : facteur thermique

Tm : température moyenne en degrés Celsius

F3 : facteur hydrique

k : coefficient de balance hydrique  $\frac{ETR}{ETP}$  sans dimension

F4 : facteur végétation

V : végétation. Indice de turgescence 0 à 5

O+ : œufs en diapause

V : vitesse de développement. Indice 0 à 5

S : survie. Indice 0 à 5

IR : indice de réussite 0 à 20

IA : indice d'arrivée 0 à 5

ID : indice de départ 0 à 5

Tableau II  
TABLE DE CORRESPONDANCE ENTRE L'INDICE DE VITESSE DE DEVELOPPEMENT  
ET LA DUREE REELLE DE CHAQUE ETAT ET STADE BIOLOGIQUE

Indice de vitesse de développement	Durées réelles en jours								
	Oeufs Temps d'incubation	Larves Stades 1 à 5					Durcissement cuticulaire	Imagos	
		L1	L2	L3	L4	L5		Vitesse de maturation ovocytaire	
5	15	4	3	5	5	5	3	10	
4	20	6	6	8	9	9	5	15	
3	30	10	10	14	17	17	9	25	
2	50	18	18	26	33	33	17	45	
1	90	34	34	50	65	65	33	85	
0	>100 (4)	>40	>40	>60	>80	>80	>40	>100	

(4) diapause de 5 à 9 mois

- la photopériode,
- la température,
- l'humidité,
- l'état de la végétation.

Les combinaisons écologiquement significatives de ces quatre facteurs-clés sont au nombre de 34. Les réponses de l'acridien mis en présence de chacune d'elles dépendent de l'état biologique ou du stade considéré. Les indices de vitesse de développement et de survie varient de 0 à 5, 0 étant la situation la plus défavorable (développement impossible, survie nulle) et 5 la plus favorable. L'indice de réussite est égal au produit des deux précédents indices. Il varie donc de 0 à 25 sur de courts intervalles de temps. En réalité, il ne dépasse pas 20 dans les conditions les plus favorables car des pertes par maladie, parasitisme et prédation, se produisent à chaque période de l'année. Pour les ailés, on considère en plus des indices d'arrivée et de départ pour tenir compte des probabilités de déplacement. Ils varient eux aussi de 0 à 5, 0 marquant une absence de déplacement et 5 des mouvements généralisés (apports ou pertes d'ailés par arrivées ou départs selon les classes d'environnement). L'échelle de temps choisie est la décade.

MANIABILITE

Le principe du traitement manuel de ce modèle consiste à établir deux graphiques :

- le premier concerne la mise en évidence des périodes potentiellement les plus favorables pour chaque état biologique. En abscisse, le facteur temps est indiqué, et en ordonnée, l'indice de réussite. Pour chaque décade, l'environnement réel est assimilé à une classe d'environnement et une lecture du tableau I donne les indices de

réussite correspondants. Ces indices sont précisés pour chaque unité de temps selon des symboles différents en fonction des états concernés : œufs, larves ou imagos.

- le second graphique représente la structure de population. En abscisse, le facteur temps est mesuré sur une échelle identique à celle utilisée pour le premier graphique et en ordonnée, les différents états et stades biologiques sont notés selon les conventions suivantes :

- O : œufs,
- L1, L2, L3, L4, L5 : larves de 1<sup>er</sup>, 2<sup>ème</sup>, 3<sup>ème</sup>, 4<sup>ème</sup>, 5<sup>ème</sup> stades,
- Mm : imagos mâles à téguments mous,
- MD : imagos mâles à téguments durs,
- Fm : imagos femelles à téguments mous,
- FNP : imagos femelles à téguments durs, n'ayant pas pondu,
- FP : imagos femelles à téguments durs, ayant pondu, soit 11 classes.

Pour chaque décade, on procède de la manière suivante :

- recherche de la classe d'environnement,
- lecture sur le tableau I des indices de vitesse de développement et de survie pour chaque état et stade selon la classe d'environnement,
- lecture sur le tableau II des durées réelles de développement correspondant à l'indice de vitesse à l'état et au stade considéré,
- report sur le graphique en fonction des états et des stades disponibles à la décade précédente.

L'établissement de l'ensemble du graphique requiert plusieurs passages pour tenir compte de la réserve en œufs du sol ayant passé la saison sèche et de l'arrivée de

différentes populations d'aîlés. Ces reconstitutions très minutieuses sont assez longues à effectuer manuellement. Au bout de quelques heures, le risque d'erreurs n'est pas négligeable, car trois à quatre documents sont à manipuler en même temps pour intégrer chaque cas particulier.

Le traitement manuel a cependant fourni des indications correctes sur les déplacements saisonniers, le domaine d'existence de l'espèce, le cycle biologique, les causes de pullulation (LAUNOIS, 1978 a), soit en corroborant ce qui était connu et rapporté par d'anciens auteurs, soit en complétant harmonieusement les connaissances actuelles. Comme le traitement manuel résultant de l'utilisation systématique des tables de correspondance est logique, il a paru judicieux d'employer l'informatique pour faciliter l'exploitation de ce modèle et en améliorer le rendement, en particulier sur deux points :

— possibilité de traiter beaucoup plus de situations et de procéder à une simulation opérationnelle :

- reconstitutions historiques,
- épreuves fictives pour déterminer les conditions favorisant un départ de pullulations ou au contraire les empêchant,

— mise à disposition plus rapide et plus facile pour des utilisateurs dans un but de formation, de surveillance, et de lutte antiacridienne.

## MODALITES D'AUTOMATISATION

### CONDITIONS LIMINAIRES

La reconstitution complète de la dynamique acridienne par exploitation automatique du modèle demande que deux conditions soient remplies :

— la conversion des données réelles décadaires sur l'environnement en valeurs utilisables par classification et calcul,

— la mise au point d'un certain nombre de conventions de lecture des tables de correspondances entre le ravageur et son environnement et de représentation des résultats en sortie d'ordinateur sur l'imprimante.

### CONVERSION DES DONNEES SUR L'ENVIRONNEMENT

La première condition est facile à satisfaire pour trois facteurs :

— **durée du jour :**

- moins de 12 heures : diapause embryonnaire,
- 12 heures ou plus : pas de diapause embryonnaire.

On peut simplifier en retenant la troisième décade de septembre comme moment de passage-d'un type de développement à un autre;

— **température :**

quatre classes :

- < 22°5C : température réelle inférieure à 22°5C
- 22°5C : température réelle égale ou supérieure à 22°5C et inférieure à 25°5C
- 25°5C : température réelle égale ou supérieure à 25°5C et inférieure à 27°5C
- 27°5C : température réelle égale ou supérieure à 27°5C.

— **état de la végétation :** admis comme la résultante des facteurs photopériodique, thermique et hydrique, ce qui permet de ne pas individualiser ce facteur.

Les conditions d'accessibilité des biotopes sont supposées non limitantes à l'échelle de précision du modèle. La disponibilité des acridiens est réduite par un arrêt de développement embryonnaire en saison sèche. On en a tenu compte en déterminant le type de pluie efficace susceptible de réactiver les œufs sortis de diapause à compter de la première décade de février.

### CALCUL DES TERMES DU BILAN HYDRIQUE

La mesure du facteur hydrique peut s'établir de différentes façons : mesure de la pluviosité, de la teneur en eau de l'air, de l'humidité du sol. *Oedaleus senegalensis* pond ses œufs dans le sol. Ces derniers ont besoin d'eau pour effectuer leur développement. De plus, les larves et les aîlés se nourrissent de graminées dont les valeurs appétitives et nutritives dépendent pour une bonne part de la disponibilité hydrique du sol. C'est pourquoi l'on a choisi un indice hydrique du sol (K) correspondant selon FOREST (1974), au rapport de l'évapotranspiration réelle ETR à l'évapotranspiration potentielle ETP.

Ce coefficient de balance hydrique est calculé dans le profil supérieur d'un sol sableux (type de sol préféré par cet acridien) de la zone sahélo-soudanienne. Comme il s'agit d'une estimation et non d'une mesure, il est nécessaire de préciser les hypothèses de calcul pour justifier le mode opératoire de l'automatisation. Les travaux de COCHEME et FRANQUIN 1967, EAGLEMAN 1971, KALMS et VALET 1975, FOREST 1976, LEGOUPIL, ANGE et ROSSET 1977, CHAROY, FOREST et LEGOUPIL 1978, sont utiles à leurs établissements.

Un sous-programme particulier a été conçu pour automatiser le calcul de K par décade à partir de l'équation du calcul du bilan hydrique :

$$P(i) + RS(i-1) = ETR(i) + RS(i) + RUS(i) + DR(i)$$

où: P(i) = pluviométrie au cours de la décade i,  
 RS(i-1) = réserve en eau en fin de décade i-1 dans le profil 0 à 100 cm,  
 ETR(i) = consommation en eau de la végétation,  
 RS(i) = réserve en eau résiduelle en fin de décade i,

- RUS(i) = ruissellement superficiel au cours de la décade i  
 DR(i) = drainage, percolation sous l'enracinement au cours de la décade i.

Pour l'usager, le calcul automatique des coefficients ki nécessite seulement :

- le nom de la station,
- la constitution du fichier ETP(i), (36 valeurs décadales),
- la constitution du fichier P(i) (36 valeurs décadales).

La sortie sur imprimante est prévue sous forme de tableau où figurent :

- le numéro de la décade : la décade 1 correspond à la 1ère décade de l'année calendaire et la décade 36 à la dernière,
- la pluviométrie décadaire P(i) en mm,
- la valeur pondérée de l'ETP décadaire ETP(i) en mm,
- l'indice d'évapotranspiration k(i), sans dimension, et variant de 0 à 1,
- la réserve en eau du sol, en mm, dans l'horizon superficiel (0 à 100 cm),
- la profondeur humectée à la capacité de rétention par infiltration dans un sol de type sableux. Cette donnée indique l'état hydrique du sol à la suite des événements pluviométriques. La valeur maximale observée délimite la frange de sol qui a été soumise à la saturation et conserve pendant un certain temps un potentiel d'eau liée, difficilement utilisable par l'enracinement, donc une humidité voisine du point de flétrissement.

La conversion des valeurs de k calculées en classes de k prévues dans le tableau I se fait selon la progression suivante :

- 0 : 0 à 0,01 inclus,
- 0,01 : 0,01 inclus à 0,05 exclus,
- 0,10 : 0,05 inclus à 0,15 exclus,
- 0,20 : 0,15 inclus à 0,25 exclus,
- 0,50 : 0,25 inclus à 0,70 exclus,
- 1,00 : 0,70 inclus à 1,00 inclus.

Le sous-programme est prévu pour fonctionner année par année.

#### CONVENTIONS DE REPRISE DU DEVELOPPEMENT DES OEUFS

De la troisième décade de septembre (D 27) à la troisième décade de janvier (D 3) incluse, soit pendant 130 jours environ, il est admis que la presque totalité de la population acridienne se trouve à l'état œuf, dans une forme particulière de résistance assimilée à une diapause. Lorsque les œufs sont pondus en fin de saison des pluies, ils s'hydratent et effectuent une partie de leur développement avant de suspendre leur évolution. Ils la reprennent plusieurs mois après, généralement aux premières pluies de la saison suivante. Il leur reste alors seu-

lement la moitié du développement à accomplir par rapport à une évolution continue. Durant toute cette période, les variations décadales de l'environnement sont considérées comme étant sans effet.

L'élimination normale de la diapause embryonnaire semble être facilitée par une période de froid relatif qui se trouve réalisée dans le Sahel en décembre ou en janvier. On considère donc qu'à partir de la première décade de février (D 4), les œufs sont capables de réagir à un environnement favorable à la reprise de leur développement. En dehors du cas particulier de la première cohorte d'œufs où le temps d'incubation est réduit de moitié (fin de développement), tous les œufs déposés dans le sol et les larves puis les ailés qui en résultent entre la première décade de février (D 4) et la deuxième décade de septembre (D 26) réagissent selon les indications fournies par le modèle.

Il est connu que les œufs d'*Oedaleus senegalensis* sont capables de résister à la sécheresse pendant une très longue période dans le sol (SARAIVA, 1962). En laboratoire, la durée maximale observée est de 22 mois (CHEKE, FISHPOOL & FORREST, 1980). Ces connaissances récentes n'affectent pas le fonctionnement du modèle car il s'agit de cas de résistance s'il n'y a pas de pluies efficaces. Des œufs n'ayant pas éclos une année et encore vivants, font partie du stock d'œufs disponibles après la saison sèche de l'année suivante. Les éclosions d'une même oothèque dans la nature ne sont pas aussi échelonnées que l'ont signalé les auteurs pré-cités (jusqu'à 570 jours) quand la diapause est levée par des températures basses. Les pontes étudiées au laboratoire de Londres étaient formées d'œufs en diapause, mis à incuber à température constante de 30°C. Dans ces conditions, il est normal d'observer des éclosions très échelonnées car l'élimination de la diapause par le temps est toujours plus progressive et moins synchrone que par le froid.

Il est estimé que la réserve en œufs du sol existe toujours en fin de saison sèche, et que les ailés sont disponibles dès les premières pluies dans le sud de l'aire de distribution de l'espèce. Les variations quantitatives peuvent évidemment être très grandes, mais il est difficile d'en tenir compte dans le modèle, car les informations sur l'importance des populations existantes en début de saison des pluies sont toujours très rares.

#### IDENTIFICATION DES POPULATIONS SUCCESSIVES ET CONVENTIONS DIVERSES DE LECTURE

Dans l'exemple de représentation de la figure 3, quelques indications de reconnaissance des populations sont utilisées :

- l'état ou le stade biologique sont identifiés par la position de leur projection sur l'axe vertical, et le moment d'étude sur l'axe horizontal,
- les identificateurs constitués uniquement par un chif-

fre désignent les populations issues des œufs ayant passé toute la saison sèche sur la station ou leur descendance,

— les arrivées d'ailés mâles ou femelles sont notées une seule fois dès l'apparition du premier environnement décadaire favorable. On considère systématiquement qu'elles sont composées d'adultes des deux sexes à téguments durs, les femelles pouvant avoir pondu ou non.

La première arrivée est désignée par la lettre A, la seconde par B, la troisième par C, et la descendance garde l'indicatif des parents pour permettre de retrouver rapidement l'origine des populations quand il y a des mélanges comme cela se produit inévitablement chaque année.

— L'indication des œufs des populations autochtones et allochtones est portée dès la première date d'apparition des parents ailés, donc en début de décade;

— pour les populations autochtones, l'indication des œufs pondus est placée au début de la décade qui suit celle où les reproductrices en état de ponte sont individualisées;

— en cas de chevauchement de cohortes, la seconde est identifiée dès que la première a fini son développement à un état donné (éclosion par exemple);

— seuls les fronts de cohortes sont indiqués en se plaçant dans l'hypothèse des développements les plus rapides dans l'environnement considéré. Cette simplification rend la lecture du graphique (2ème analyse) plus aisée;

— si, au moment de la troisième décade de septembre, des larves sont présentes, elles sont suivies jusqu'à l'état imaginal. Tous les œufs produits sont considérés comme étant en état de diapause (\*);

— il arrive que l'indice d'arrivée des ailés soit égal à 5 pendant plusieurs décades. Il n'est pas possible de mettre à chaque fois l'indication des apports, car au niveau de la descendance, la lecture du graphique serait impossible à cause des chevauchements. Deux conventions sont adoptées pour limiter ce risque :

• dans le cas où deux décades successives ont un indice  $IA = 5$ , l'indication des arrivées est portée au début de la première décade,

• dans le cas où plus de deux décades successives ont un indice  $IA = 5$ , l'indication des arrivées est placée au début de la première décade et de la dernière décade.

#### EVALUATION DE LA DUREE DES STADES CHEVAUCHANT DEUX DECADES

Lorsqu'un stade n'est pas achevé au 10ème jour d'une

décade, le reste du développement est calculé en fonction du nouvel environnement sur la base de la fraction de développement restant à accomplir. Par exemple, si une larve de 3ème stade a encore 1/3 de développement à faire avant de passer en 4ème stade, le temps de développement restant à effectuer est calculé en fonction des caractéristiques de la décade suivante pour 1/3 du nouveau temps de développement. Cette approximation rend possible l'automatisation du calcul de la durée de chaque stade sur une échelle journalière superposée à l'échelle décadaire.

#### CRITERES DE DECISION POUR LE SUIVI DE LA DESCENDANCE D'UNE POPULATION LOCALE

Lorsque l'évolution complète d'une population autochtone conduit à l'apparition d'ailés à téguments durs susceptibles de pondre après un certain délai de maturation, il faut apprécier les chances pour que ces ailés désertent la station et ne laissent pas de descendance sur place ou au contraire se sédentarisent. La décision automatique se fait en fonction des critères suivants :

— si deux décades successives présentent un indice de départ  $ID = 5$ , et que la première décade est celle de l'apparition des femelles en état de ponte, la descendance de cette population sur place est négligeable et n'est pas suivie,

— si deux décades consécutives ont un indice de départ  $ID$  inférieur à 5, et que la première décade est celle de l'apparition des femelles en état de ponte, une descendance est possible. Le dépôt des œufs est alors indiqué sur le graphique au 1<sup>er</sup> jour de la décade qui suit l'apparition des femelles gravides.

Dans tous les cas, une multiplication sur place est envisagée.

#### REPRESENTATION GRAPHIQUE DE LA DYNAMIQUE DES POPULATIONS LOCALES

La reconstitution complète de la dynamique acridienne par modélisation requiert deux analyses complémentaires comme dans le cas d'un traitement manuel.

**1ère analyse : Examen décadaire des indices de réussite des œufs (IRO), des larves (IRL) et des imagos (IRI)** ainsi que des indices de départ (ID) et d'arrivée (IA) de ceux-ci. Les indices de réussite varient de 0 à 20, 20 étant très favorable à l'espèce sur de courts intervalles de temps, et les indices de déplacement de 0 à 5, 5 caractérisant la probabilité maximale de voir se réaliser l'événement attendu. Le tableau V montre un exemple de résultats obtenus pour l'année 1975 à Maradi (Niger). Deux périodes sont très favorables à l'évolution des populations d'*Oedaleus senegalensis* : en début et en fin de saison des pluies et trois vagues importantes de départ ainsi que deux vagues d'arrivée sont annoncées.



Cette première analyse décrit les périodes où l'environnement est favorable ou défavorable à l'espèce acridienne avec différents degrés sur le plan de la réussite en général, c'est-à-dire la survie maximale dans le cas des développements les plus rapides, ou des déplacements par vol à longue distance pour les individus ailés. A ce stade, il ne s'agit que de potentialités.

**2ème analyse : Evolution chronologique des populations acridiennes d'après les changements de structure de population.** Il a été indiqué qu'une catégorie est retenue pour les œufs, cinq pour les larves, deux pour les adultes mâles et trois pour les adultes femelles, soit au total 11 classes d'individus.

Tableau III  
INTERPRETATION DE LA VALEUR DE CHAQUE ENVIRONNEMENT DECADEIRE POUR LES OEUFS, LES LARVES ET LES AILES

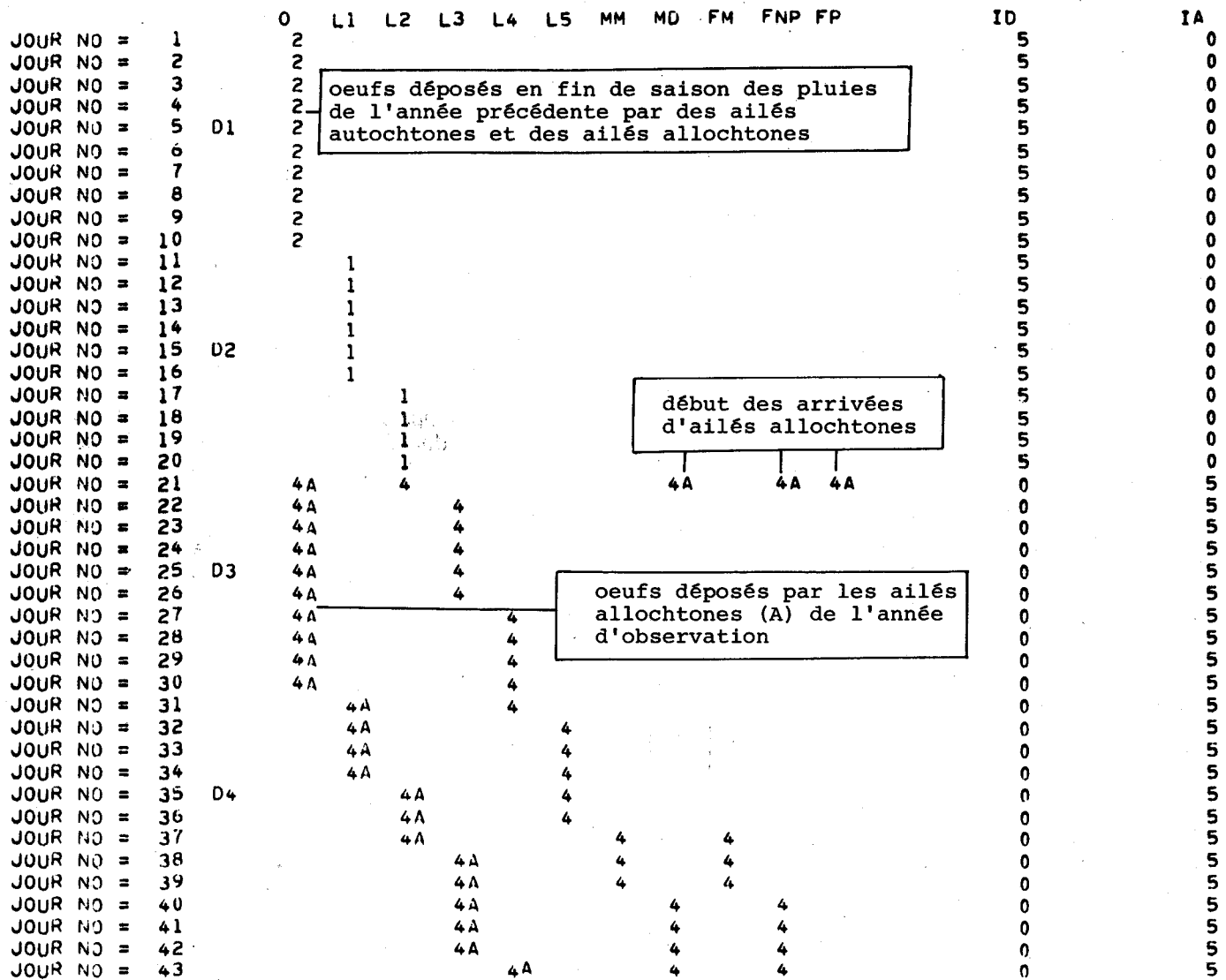
1975 - MARADI	IRO	IRL	IRI	ID	IA
Décade NO = 1	0	0	0	0	0
Décade NO = 2	0	0	0	0	0
Décade NO = 3	0	0	0	0	0
Décade NO = 4	0	0	0	0	0
Décade NO = 5	0	0	0	0	0
Décade NO = 6	0	0	0	0	0
Décade NO = 7	0	0	0	0	0
Décade NO = 8	0	0	0	0	0
Décade NO = 9	0	0	0	0	0
Décade NO = 10	0	0	0	0	0
Décade NO = 11	0	0	0	0	0
Décade NO = 12	0	0	0	5	0
Décade NO = 13	12	4	4	5	0
Décade NO = 14	20	20	20	0	5
Décade NO = 15	20	20	20	0	5
Décade NO = 16	20	20	20	0	5
Décade NO = 17	20	20	20	0	5
Décade NO = 18	20	20	20	0	5
Décade NO = 19	20	20	20	0	5
Décade NO = 20	20	20	20	0	5
Décade NO = 21	12	4	4	0	2
Décade NO = 22	0	2	2	3	0
Décade NO = 23	3	2	2	3	0
Décade NO = 24	0	2	2	3	0
Décade NO = 25	0	2	2	3	0
Décade NO = 26	0	2	2	3	0
Décade NO = 27	20	20	20	0	5
Décade NO = 28	20	20	20	0	5
Décade NO = 29	3	1	1	2	0
Décade NO = 30	0	1	1	2	0
Décade NO = 31	0	1	1	2	0
Décade NO = 32	0	1	1	2	0
Décade NO = 33	0	1	1	2	0
Décade NO = 34	0	0	0	1	0
Décade NO = 35	0	0	0	0	0
Décade NO = 36	0	0	0	0	0

D'après le tableau II, certains stades risquent de ne pas apparaître si l'on reste sur un pas de temps décadaire car ils durent nettement moins de dix jours. Cette constatation conduit à imaginer une reconstitution journalière des états et des stades biologiques présents, en considérant toujours l'environnement sur un pas décadaire. L'avantage de ce procédé est de permettre une meilleure représentation de l'évolution des populations sans pour autant aller au delà de la précision admise quant à la caractérisation de l'environnement sur la base des critères retenus. L'indication des indices de départ et d'arrivée apporte un élément dynamique supplémentaire. La représentation fournie par l'ordinateur se rapproche aussi près que possible de celle illustrant habituellement les études de dynamique de populations traitées par graphique selon les normes classiques.

L'exemple donné dans la figure 2 montre en abscisse l'échelle de temps avec indication des jours et des décades, et en ordonnée les 11 classes d'individus dans un ordre logique (une seule discontinuité pour les ailés des deux sexes), surmontées des indices de déplacement. La position de chaque type d'individu est indiquée non par un point mais par un chiffre qui correspond à la valeur de l'indice de survie. S'il est égal à 0, la mortalité est pratiquement totale; s'il est égal à 5, la survie est maximale. Les cas intermédiaires sont prévus. On a donc une indication instantanée de l'effet du milieu sur les états et les stades sensibles. La position relative des chiffres pour le passage d'un stade à l'autre renseigne sur la vitesse de développement. L'allure de la pente est donc révélatrice d'une croissance rapide ou lente.

Dans l'exemple de la figure 2, le développement des œufs présents en décade D1 est d'abord envisagé (exemple fictif). Puis des arrivées d'ailés détectés par IA sont indiquées (A) et l'avenir de leur descendance est aussi mentionné (tous les chiffres affectés de la lettre A). Pour plus de clarté, seuls les fronts de cohortes sont représentés. L'état de diapause des œufs est indiqué par une étoile. Le développement est suspendu et l'embryon échappe pour un temps aux aléas climatiques. Cette deuxième analyse se rapproche des conditions réelles de réponse des acridiens en tenant compte des limites biologiques de temps de développement. Le réexamen de l'avenir de chaque tranche d'âge est fait chaque jour. Ainsi, pour décider de l'effet d'un environnement à la décade D2, il est nécessaire de connaître les états disponibles à la décade précédente D1, au moins au niveau des populations locales.

Figure 2 : Exemple de représentation schématique de l'évolution des populations acridiennes



oeufs déposés en fin de saison des pluies de l'année précédente par des ailés autochtones et des ailés allochtones

début des arrivées d'ailés allochtones

oeufs déposés par les ailés allochtones (A) de l'année d'observation

O : œufs,  
 L1, L2, L3, L4, L5 : larves de 1<sup>er</sup>, 2<sup>ème</sup>, 3<sup>ème</sup>, 4<sup>ème</sup>, 5<sup>ème</sup> stades,  
 Mm : imagos mâles à téguments mous,  
 MD : imagos mâles à téguments durs,  
 Fm : imagos femelles à téguments mous

FNP : imagos femelles à téguments durs, n'ayant pas pondu,  
 FP : imagos femelles à téguments durs, ayant pondu,  
 ID : indice de départ  
 IA : indice d'arrivée  
 D1, D2, D3 : 1<sup>ère</sup>, 2<sup>ème</sup>, 3<sup>ème</sup> décades.

EXEMPLE DE SIMULATION

Quatre groupes de données seulement doivent être introduits dans le modèle pour chacune des 36 décades de l'année :

- la durée du jour en heures et minutes,
- la température moyenne en degrés,
- la pluviométrie en millimètres,
- l'évapotranspiration en millimètres (données du bac classe A).

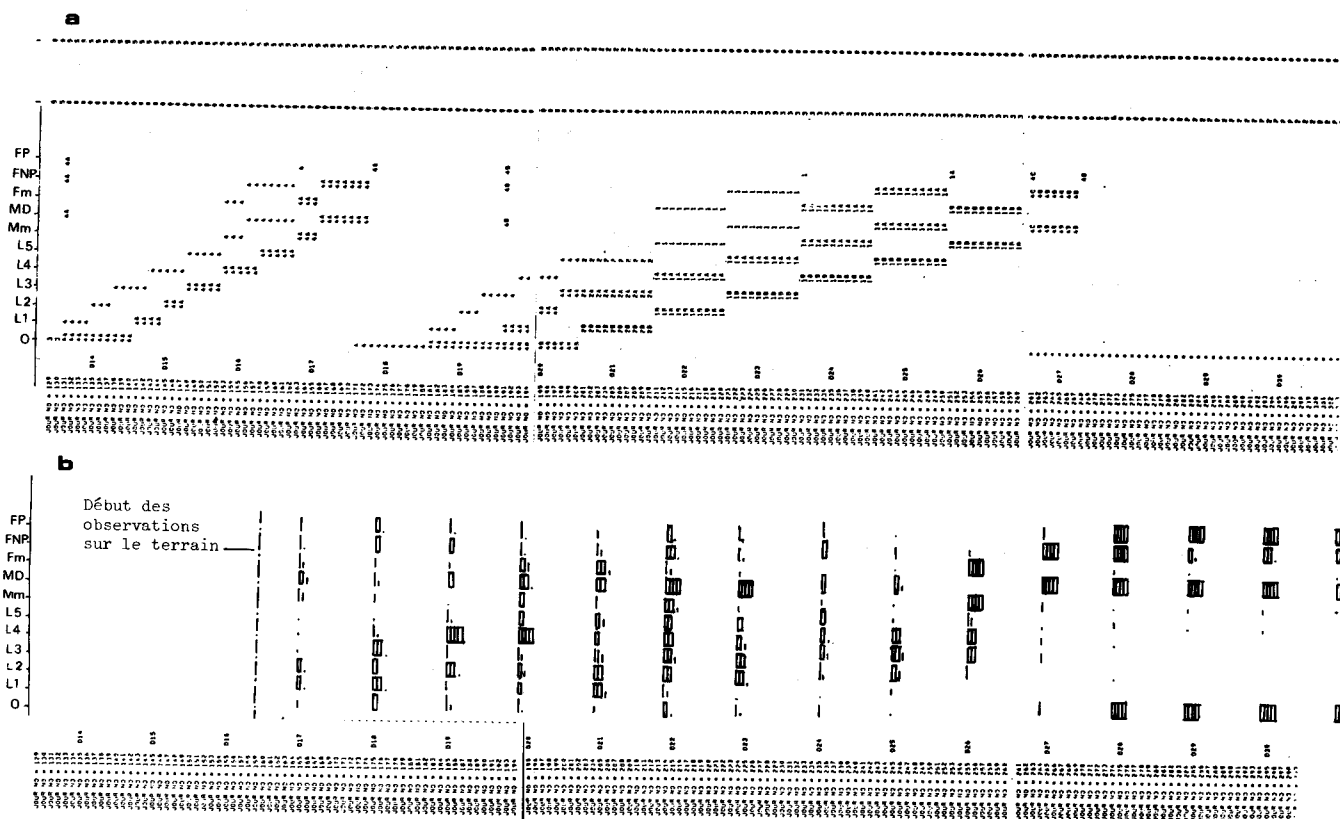
Il est possible de remplacer la première indication par une valeur calendaire du type :

- induction de la diapause embryonnaire à compter de la 3<sup>ème</sup> décade de septembre (zone sahélienne),
- levée de diapause embryonnaire (après un choc thermique dû au froid à compter du 1<sup>er</sup> février donnant la possibilité aux œufs de réagir à des conditions d'environnement favorables.

La figure 3a représente une partie du graphique complet brut imprimé après le traitement par ordinateur. L'effort de présentation des résultats assure une bonne lisibilité pour l'acridologue.

La figure 3b montre l'aspect général de la structure de populations pour une même période de temps d'après les captures décadaires d'acridiens de tout âge.

Figure 3 : Confrontation des déductions du modèle avec les captures d'acridiens réellement effectuées à Maradi (Niger), en 1975.



3a : Représentation graphique de l'évolution acridienne par l'imprimante de l'ordinateur  
 3b : Représentation manuelle de l'évolution acridienne d'après les captures effectuées.

Dans l'ensemble, la confrontation entre une image de la réalité (3b) et le résultat du traitement informatique (3a) est satisfaisante, compte-tenu de la simplicité du modèle en regard de la complexité des situations acridiennes naturelles. La nécessité de ne représenter que le front des cohortes est un handicap pour la mise en évidence de tous les événements possibles.

Le programme de simulation automatique utilise 337 cartes perforées et occupe 56 milliers d'octets en mémoire centrale y compris le sous-programme de calcul de l'indice hydrique k, ce qui reste très maniable.

En 4 secondes, la dynamique des populations d'*Oedaleus senegalensis* peut être reconstituée en une région donnée et pour une année particulière. Plusieurs heures de compilation manuelle seraient nécessaires pour obtenir le même résultat. La puissance d'exploitation du modèle est donc considérablement renforcée.

### DOMAINES D'APPLICATION

Les domaines d'application du modèle acridologique automatique peuvent se ramener à trois types d'études :

- historiques,
- contemporaines,
- prévisionnelles,

avant d'envisager les améliorations possibles.

### ETUDES HISTORIQUES

Les archives sur *Oedaleus senegalensis* sont rares, à l'exception de quelques signalisations dont la fréquence dépend des pullulations. De plus, les confusions d'espèces altèrent la valeur d'une partie des documents existants. Cette carence gêne l'étude historique du cycle

biologique caractéristique de cette espèce. L'utilisation du modèle offre deux possibilités d'y pallier :

**Première possibilité :** introduire les données d'environnement décennales sous forme de moyennes représentatives d'une année « normale » pour étudier le cycle biologique le plus probable de l'acridien en différents points de son aire.

**Deuxième possibilité :** introduire les données d'environnement décennales disponibles sur une très longue période pour quelques régions où des données météorologiques sûres ont été collectées. Ainsi, on peut reconstituer en 2 minutes grâce à l'exploitation automatique du modèle l'évolution acridienne des 30 dernières années en un site précis si l'on peut admettre les hypothèses d'universalité du modèle (les mêmes causes conduisent aux mêmes effets). Des statistiques déductives sont alors possibles pour dégager le cycle biologique moyen et ses variantes à défaut d'archives utilisables. La vérification d'une partie des résultats est possible au niveau des événements acridiens marquants qui ont laissé des traces dans les documents anciens.

#### ETUDES CONTEMPORAINES

La simulation opérationnelle sur modèle automatique apporte des renseignements utiles pour la surveillance des acridiens de type « sauteriaux ». La reconstitution de la dynamique des populations en différentes régions d'un pays permet de cerner les zones critiques où des inspections terrestres doivent être organisées. De surcroît, il est possible de tenir compte de l'évolution de l'environnement décade après décade pour distinguer les événements possibles de ceux qui sont irréalisables (contraintes biologiques de temps de développement).

#### ETUDES PREVISIONNELLES

Les prévisions à court terme que peut fournir le modèle sont de l'ordre de la décade. Au delà, la limite de diagnostic est liée au pronostic météorologique. L'étude probabiliste de l'évolution acridienne à court terme pourrait être associée à une étude fréquentielle des événements météorologiques. Néanmoins, certaines prévisions à long terme sont possibles à cause de la diapause embryonnaire de saison sèche. L'importance des pontes et la répartition de celles-ci en fin de saison des pluies permettent de préciser les zones où une surveillance étroite et peut-être des opérations de lutte risquent d'être indispensables au début de la saison des pluies suivante pour protéger les jeunes plantules cultivées (LAUNOIS-LUONG et LAUNOIS, 1977).

L'exploitation automatique du modèle offre toutes les possibilités de tester une gamme de conditions d'environnement pour découvrir les circonstances favorables au déclenchement des pullulations ou au contraire les périodes de rémission. Les enseignements que l'on en

tire ont des conséquences importantes sur l'organisation de la surveillance anti-acridienne.

#### AMELIORATIONS POSSIBLES

Le modèle écologique propre à *Oedaleus senegalensis*, construit à partir de situations réelles naturelles, comporte certainement une bonne part d'empirisme, mais son fonctionnement apporte des indications nouvelles pour mieux comprendre la dynamique des populations de cette espèce. De nombreuses améliorations sont certainement possibles car ce modèle est fondé sur l'exploitation de connaissances nouvelles, et s'enrichit du présent.

Dans l'immédiat, deux perfectionnements pourraient être apportés :

- Le premier consisterait à intégrer les indices de survie pour chaque état et chaque stade d'une même cohorte pour mettre au point un coefficient mathématique caractérisant la survie pondérée d'une population individualisée.
- Le second serait d'évaluer la disponibilité des ailés sur l'ensemble de l'aire de distribution de l'espèce en appliquant simultanément le modèle dans différents points représentatifs pour tenir compte de ce facteur lors d'une deuxième lecture afin de rapprocher la probabilité de réalisation de chaque événement acridien de la réalité.

#### CONCLUSIONS

Le modèle écologique mis au point pour l'un des principaux acridiens de type « sauteriaux » ravageurs des cultures vivrières au Sahel, *Oedaleus senegalensis*, est de conception simple et de portée très pratique. Il part d'une connaissance approfondie des situations réelles pour établir une table de correspondance entre les types d'environnement décrits par quelques facteurs écologiques sur une base décennale et les réponses de l'acridien à ses différents états et stades biologiques.

A l'origine, le modèle est explicatif à la méso-échelle. Il permet de remonter de l'effet à la cause en expliquant pourquoi tel effet s'est produit. Il est aussi prévisionnel pour déduire l'effet de la cause et devient un modèle d'action pour prévoir les effets produits par certaines causes supposées sous son contrôle.

La transcription des mesures de l'environnement en éléments utilisables par l'ordinateur a exigé la mise au point d'un sous-programme de calcul d'un indice d'humidification superficielle du sol et d'un programme principal de lecture des tables de correspondances codifiées ainsi qu'un ensemble de conventions permettant de procéder à des tests de décision automatique.

Les progrès accomplis par l'automatisation rendent ce modèle plus facile à exploiter. La reconstitution théorique de la dynamique acridienne annuelle en un site

donné demande 4 secondes seulement. Les résultats transcrits par l'imprimante de l'ordinateur sont très accessibles pour l'utilisateur. Il est maintenant possible de procéder à des simulations, c'est-à-dire à des études de possibilités à partir de faits réels sur des années passées, présentes ou imaginaires, mais toujours écologiquement significatives. L'introduction de l'informatique améliore la maniabilité du modèle, mais n'affecte pas les caractéristiques initiales de celui-ci.

Très simple de conception, le modèle est cependant capable de reconstituer une image approchée de la réalité aussi satisfaisante que les modèles biomathématiques, surtout dans le cadre des études extensives à l'échelle du Sahel. A ce titre, il appartient à une génération de modèles partant non plus du mathématicien mais du biologiste ou de l'écologiste, et trouvant son origine dans les situations concrètes et non dans les théories.

Le modèle automatisé est opérationnel dans sa forme actuelle et peut servir aux pays africains du Sahel pour lesquels il a été conçu. Dans un cadre d'écologie opérationnelle (DURANTON & LAUNOIS, 1978), il devrait ouvrir des possibilités méthodologiques nouvelles pour l'étude d'autres ravageurs en zone tropicale semi-aride.

### Remerciements

Les auteurs remercient Monsieur J. LANFRANCHI, Conseiller Scientifique Permanent du GERDAT, Monsieur TOURTE, Représentant de l'IRAT au Centre de Recherches GERDAT de Montpellier, Monsieur WEIL, Chef du Service de Méthodologie de l'IRAT et Monsieur BRENIERE, Chef du Service de Défense des Cultures de l'IRAT, pour avoir encouragé ce travail pluridisciplinaire.

### Bibliographie

- BATHIA D.R. et AHLUWALIA P.T.S., 1966 — *Oedaleus senegalensis*, KRAUSS (*Orthoptera: Acrididae* sub family *Oedipodinae*) plague in Rajasthan (India). Pl. Prot. Bull., (New Delhi). **18**: 8 - 12.
- BATTEN A., 1969 — The Senegalense grasshopper *Oedaleus senegalensis* KRAUSS. J. Appl. Ecol., **6**: 27 - 45.
- CHAROY J., FOREST F. et LEGOUIL J.-C., 1978 — Evapotranspiration - Besoins en eau des cultures - Relation eau-sol - Estimation fréquentielle des conditions d'alimentation hydrique en culture pluviale et irriguée - Bilan hydrique. Rapport IRAT Hydraulique agricole: 183 pp.
- CHASSE J.L., LEGAY J.M. et PAVE A., 1977 — Le modèle de Volterra-Kostitzin en dynamique des populations. Ajustement et interprétation des paramètres. Ann. Zool. Ecol. anim., **9** (3): 425-441.
- CHEKE R.A., FISHPOOL L.D.C. et FORREST G.A., 1980 — *Oedaleus senegalensis* (KRAUSS) (*Orthoptera: Acrididae: Oedipodinae*): An account of the 1977 outbreak in West Africa and notes on eclosion under laboratory conditions. Acrida, **9** (3): 107-132.
- CHOPARD L., 1950 — Contribution à l'étude de l'Air. Orthopteroïdes. Mem. Inst. Fr. Afr. Noire, **10**: 127-145.
- COACHEME J. ET FRANQUIN P., 1967 — Une étude d'agrocimatologie de l'Afrique sèche au Sud du Sahara en Afrique Occidentale. FAO-UNESCO-OMM., (Rome): 325 pp.
- DAVEY J.T., DESCAMPS M. et DEMANGE R., 1959 — Notes on the *Acrididae* of the French Sudan with special reference to Central Niger Delta. part II. Bulletin IFAN, **21** A(2): 565-600.
- DESCAMPS M., 1975 — Visite d'expert-conseil dans le bassin Tchadien. Etudes biologiques. PNUD(FS)AML/BIO/FAO. (Rome). 14 pp.
- DURANTON J.F. et LAUNOIS M., 1978. Ecologie opérationnelle en zone tropicale semi-aride. Ministère de la Coopération (Paris) 31 pp.
- DURANTON J.F., LAUNOIS M., LAUNOIS-LUONG M.H. et LECOQ M., 1978 - Programme de Recherches Interdisciplinaire Français sur les Acridiens du Sahel. PRIFAS. 1975-1978. Bilan scientifique et technique. Ministère de la Coopération (Paris) : 26 pp.
- EAGLEMAN J.R., 1971 — An experimentally derived model for actual evapotranspiration. Agric. meteorol, **8** (4-5): 385-394.
- FOREST F. 1974 — Bilan hydrique efficace et prospective décennale des besoins en eau des cultures pluviales en zone soudano-sahélienne. Cahier pédagogique. Soixante cahiers opérationnels. Ministère de la Coopération (Paris).
- FRANQUIN P. et FOREST F., 1976 — Des programmes pour l'évaluation et l'analyse fréquentielle des termes du bilan hydrique. Ext. de l'Agronomie Tropicale, **22** (1).
- HERGERT C.R., 1975 — An analysis of grasshopper problems in Kano State. Samaru. Agricultural Newsletter. **17** (3): 91-94.
- JAGO N.D., 1968 — A checklist of the grasshoppers (*Orthoptera, Acrididae*) recorded from Ghana, with biological notes and extracts from the recent literature. Transactions of the American Entomological Society, **94**: 209-353.
- JOYCE R.J.V., 1952 — The ecology of grasshoppers in East Central Sudan. Anti Locust Bulletin, **11**: 99 pp.
- KALMS J.M. et VALET S., 1975 — Détermination des besoins en eau de différentes cultures vivrières et industrielles, dans les conditions pédo-climatiques des terrasses du Niger à Tillabéry. Rapport INRAN.
- LAUNOIS M., 1974 a — Visite d'expert-conseil au Mali. 21 juillet au 21 août 1974 (version française et version anglaise) UNDP(SF) AML/BIO/4. FAO (Rome): 42 pp.
- LAUNOIS M., 1974 b — Influence du facteur pluviométrique sur l'évolution saisonnière du Criquet migrateur en phase solitaire et sur sa grégarisation à Madagascar. Thèse de Doctorat d'Etat. Ministère de la Coopération, (Paris): 159 pp.
- LAUNOIS M., 1978 a — Modélisation écologique et simulation opérationnelle en acridologie. Application à *Oedaleus senegalensis* (KRAUSS). Ministère de la Coopération. (Paris): 214 pp.
- LAUNOIS M., 1978 b — Manuel pratique d'identification des principaux Acridiens du Sahel. Ministère de la Coopération (Paris): 304 pp.
- LAUNOIS M., 1979 — An ecological model for the study of the grasshopper *Oedaleus senegalensis* in West Africa. Phil. Trans. R. Soc. Lond. **287**: 345-355.
- LAUNOIS M. et LAUNOIS-LUONG M.H., 1977 — Principaux résultats 1976 : Recherche, surveillance, lutte. Rapport GERDAT/PRIFAS: 11 pp.
- LAUNOIS-LUONG M.H., 1978 — Comparaison des valeurs appétitives de deux substrats d'appâts empoisonnés (le son de mil et le son d'arachide) pour 14 Acridiens du Sahel. L'Agronomie tropicale. **23**(3): 237-240.
- LAUNOIS-LUONG M.H., 1979 a — Etude expérimentale des potentialités de dégâts des principaux Acridiens du Sahel. Bull. IFAN. **41**/A/4: 774-814.
- LAUNOIS-LUONG M.H., 1979 b — Etude de la production des œufs d'*Oedaleus senegalensis* (KRAUSS) au Niger (Région de Maradi). Bull. IFAN. **41**/A/1: 128-148.
- LEBRETON J.D., 1973 — Introduction aux modèles mathématiques de la dynamique des populations. Informatique et Biosphère: 75-116.
- LECOQ M., 1974 — Rapport d'expert-conseil au Mali et au Bassin du Lac Tchad. UNDP(SF)AML/BIO/5. FAO (Rome): 38 pp.
- LECOQ M., 1978 a — Les déplacements par vol à grande distance chez les Acridiens des zones sahélienne et soudanienne en Afrique de l'Ouest. C.R. Acad. Sc. Paris, **286** (D): 419-422.
- LECOQ M., 1978 b — Le problème Sauteriaux en Afrique Soudano-sahélienne. L'Agronomie tropicale. **23** (3): 241-258.
- LECOQ M., 1978 c — Biologie et dynamique d'un peuplement acridien de zone soudanienne en Afrique de l'Ouest (*Orthoptera, Acrididae*). Ann.Soc.Ent.Fr., **14**(4): 80 pp.
- LEGAY J.M., 1973 — La méthode des modèles. Etat actuel de la méthode expérimentale. Informatique et Biosphère: 6-73.
- LEGOUIL J.-C., ANGE A., et ROSSET J.M., 1977 — Bilan automatique et fréquentiel pour l'analyse du déficit d'alimentation. Application aux projets hydro-agricoles. Rapport IRAT - Hydraulique agricole.
- MALLAMAIRE A., 1948 — Acridiens migrants et acridiens sédentaires en Afrique Occidentale. Agron. trop. **3**: 630-634.
- PASQUIER R., in FAO, 1967 — Manuel Antiacridien. FAO (Rome): 164 pp.
- POPOV G., 1975 — Pullulations de sauteriaux en Afrique de l'Ouest durant l'année 1974. Document photocopié non publié OCLALAV (Dakar): 6 pp.
- SARAIVA A.C., 1962 — Plague Locusts. *Oedaleus senegalensis* (KRAUSS) et *Schistocerca gregaria* (FORSKAL) in the Cape Verde Islands (in Portuguese with English summary). Estudos agron., **3**: 61-89.
- THOM R., 1977 — Stabilité structurelle et morphogénèse. Deuxième édition. Inter-Editions (Paris): 351 pp.