

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse

Herausgeber: Schweizerischer Forstverein

Band: 123 (1972)

Heft: 10

Artikel: Simulation de l'évolution de forêts régulières en fonction du traitement sylvicole

Autor: Bartet, J.H. / Pleines, W.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-765075>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 19.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Simulation de l'évolution de forêts régulières en fonction du traitement sylvicole

Par *J. H. Bartet, W. Pleines*

Oxf.: 624

1. Introduction

Sous l'impulsion de *René Badan*, le Service cantonal des forêts de Lausanne a réalisé un ensemble d'inventaires par échantillonnage dont l'interprétation (*Horisberger*, 1969) a permis de tirer rapidement une planification à moyen terme sous la forme de révision des plans d'aménagement (*Robert*, 1969). L'urgence de cette révision a conduit à n'aborder qu'ensuite les problèmes de planification à long terme, malgré leur importance.

La position du canton était la suivante: d'une part, les décisions (ou les absences de décision) en matière forestière ont obligatoirement des conséquences à long terme et très long terme; il s'agissait donc d'obtenir des instruments permettant de mieux raisonner ces conséquences. D'autre part, les arbres qui seront coupés dans les 50 ans à venir sont déjà, pour la plupart, dans les forêts. Il s'agissait donc de tirer de la connaissance de la forêt (par l'inventaire) l'effet de différentes politiques forestières sur la production future et sur l'évolution de la forêt, puis d'essayer de choisir la meilleure.

Mais cette préoccupation déborde le seul intérêt cantonal. Grâce à l'intérêt et l'appui du Professeur *A. Kurt*, nous avons formé une équipe assurant la collaboration de l'Ecole polytechnique fédérale et du Service cantonal des forêts.

Le modèle présenté ici est un des résultats de cette collaboration. Il cherche à représenter l'influence des choix sylvicoles sur la production future de peuplements « réguliers », purs ou mélangés, d'épicéa et de hêtre.

2. Problème posé et contexte du travail

2.1 Planification en matière forestière

Le but de la planification est la meilleure utilisation possible des ressources mobilisables, en fonction des besoins présents et futurs. La planification a donc une importance primordiale pour la prospérité humaine

N.B.: Les références bibliographiques sont données dans l'article des mêmes auteurs: «Revue des méthodes proposées pour la prospective et la planification à long terme en matière forestière.» Cf. Journal forestier suisse, 9/1972.

et économique. Cela est particulièrement vrai de l'« aménagement » forestier, c'est-à-dire de la planification de la gestion, car des capitaux importants y sont immobilisés pendant longtemps et les délais de production sont si longs que des décisions pratiquement routinières équivalent à une orientation à long terme de la production (par exemple choix des essences, écartement entre les plants, etc.): le « court » terme peut profondément influencer le « long terme ». Il devrait en être de même vice-versa...

Un système complet de planification est donc complexe. Il comporte plusieurs niveaux selon sa durée et la responsabilité concernée. On en retient souvent trois:

1. Détermination des objectifs, à long terme et sur un plan régional: responsabilité centrale.
2. Détermination des politiques à moyen terme et sur le plan d'une unité forestière. C'est l'aménagement forestier traditionnel !
3. Etablissement de programmes à court terme — responsabilité locale d'exécution.

Le « système » de gestion doit de plus comprendre un processus de contrôle (feed-back), permettant une adaptation continue de la planification aux trois niveaux en fonction des changements imprévus.

La planification devient inefficace et même néfaste si les objectifs des différents niveaux ne correspondent pas (par exemple conflit d'intérêts entre l'Etat et les propriétaires particuliers). L'une de ses tâches essentielles est de reconnaître à temps ces *conflits* et de les résoudre de façon à satisfaire les différentes parties. Cette tâche est rendue d'autant plus difficile par le fait que certains facteurs de production (« l'offre ») sont peu ou pas influençables, que l'effet des traitements et surtout leurs interactions sont difficilement quantifiables et que les fonctions futures de la forêt (la « demande ») sont difficilement prévisibles. Dans de pareilles situations, on a besoin de recourir à des « modèles ».

2.2 Le contexte vaudois et le problème posé

En plus du contexte général que nous venons d'évoquer, le canton de Vaud a certains problèmes spécifiques à résoudre. Il s'est engagé dans une politique de récolte de l'excédent du matériel sur pied capitalisé dans le passé. Il s'agit d'étudier les conséquences de ces mesures sur l'évolution de la structure forestière, sur l'évolution de la production régionale et d'essayer de maîtriser au mieux ces évolutions pour assurer une situation économique la plus saine possible. En d'autres termes, le problème est le suivant: nous connaissons les peuplements par les résultats de l'inventaire. Quelle éclaircie et quelle régénération faut-il leur appliquer pour que:

1. la structure de ces peuplements s'améliore rapidement ?
 2. la production de bois ne présente pas de trop fortes fluctuations ?
- Quelle sera alors l'évolution de cette production ?

Pour le résoudre avec les moyens à disposition, nous avons voulu construire un modèle qui applique aux peuplements réels une sylviculture réaliste et nous donne l'évolution consécutive des peuplements et la production de bois obtenue. Ceci dans un contexte de forêts hétérogènes et de sylviculture fine propre à l'Europe occidentale continentale.

2.3 Définition de l'outil de planification choisi: la simulation

Après étude des différentes approches possibles (*Bartet, Pleines 1972*), il est apparu que la méthode la mieux adaptée aux buts recherchés et aux moyens à disposition était la simulation, basée sur un modèle de développement par peuplement, avec comme « moteur » les tables de production suisses (*Badoux 1964*).

Définitions:

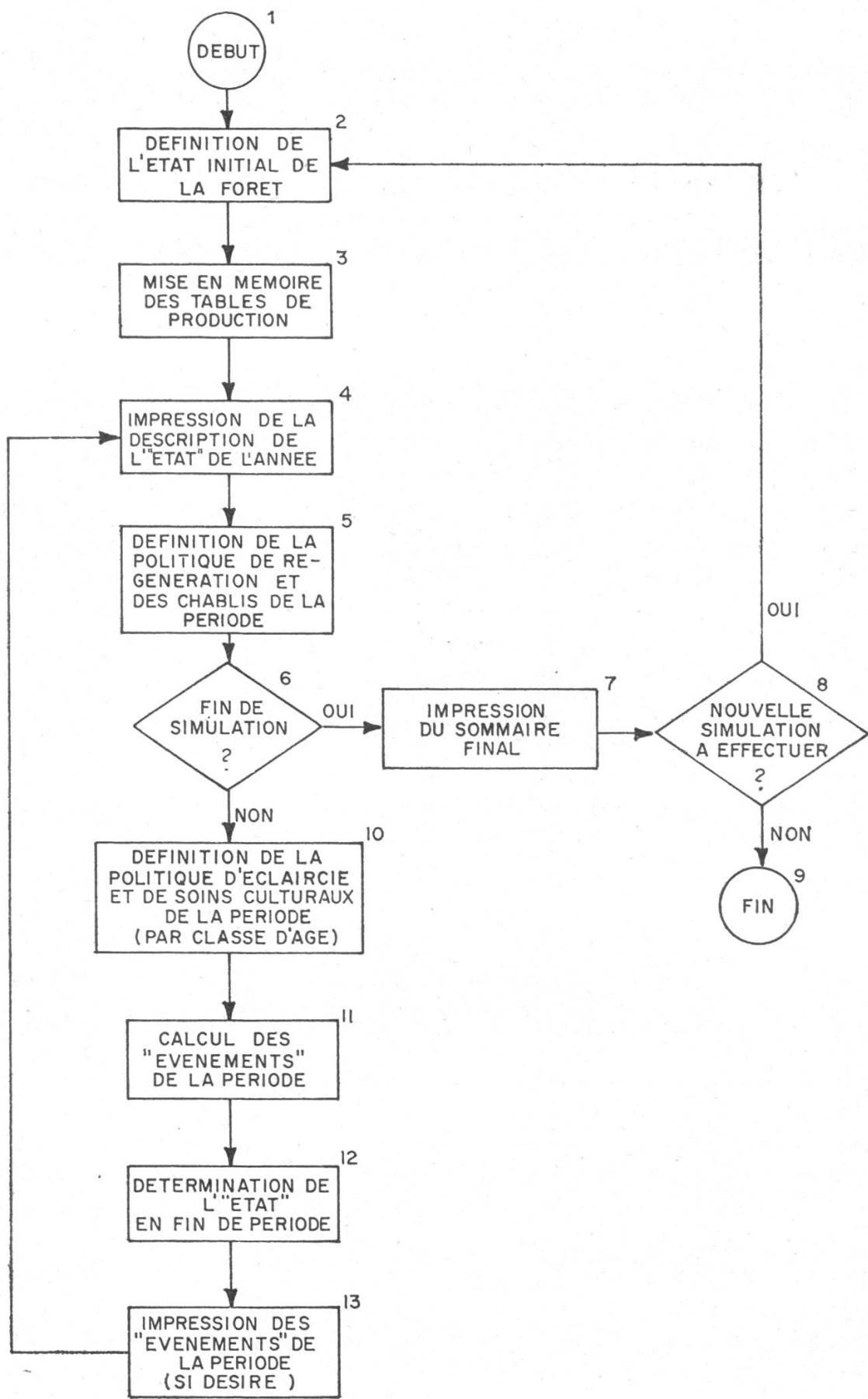
- La « simulation » est une technique de recherche opérationnelle qui permet d'imiter l'occurrence d'un événement, sans qu'il doive se produire en réalité.
- Un « modèle » est une représentation simplifiée de la réalité.
- Un « modèle de développement par peuplement » est une représentation de la forêt, où l'unité de référence est le peuplement, par opposition aux modèles où l'arbre représente l'unité de base de la croissance. Les tables de production du Dr Badoux ont été choisie comme étalon de la dynamique des peuplements, car elles contiennent sous une forme synthétique et bien suivie la meilleure source de renseignements sur la croissance de peuplements équiennes en Suisse (placettes permanentes d'essais de production, commencés il y a plus de 60 ans et gérés par seulement 3 chercheurs, tous de grand renom: *Philippe Flury, Henry et Eric Badoux*).

3. Construction du modèle de simulation

3.1 Le système

Partant d'un « état initial » donné par les résultats de l'inventaire d'aménagement, différentes politiques de traitement (interventions sylvicoles) peuvent être définies pour chaque période de développement futur. L'évolution indiquée par les tables de production est calculée et ensuite corrigée en fonction des traitements prescrits, ce qui permet de déterminer l'état final pour la période. Au début de la période d'évolution suivante, l'état final devient le nouvel état initial, et ainsi de suite, aussi longtemps que nécessaire. L'état initial puis, pour chaque période, l'état final et les « événements » de la période sont imprimés. En fin de travail, un sommaire permet de résumer l'essentiel de la simulation.

FIGURE 1: SCHEMA DU SYSTEME DE SIMULATION "FORSIM"



3.2 Eléments de départ

— Définition de l'état initial

Nous avons décidé de prendre comme état de la forêt le contenu des cartes perforées obtenues après traitement des résultats de l'inventaire en vue de l'aménagement (Guide d'aménagement vaudois 1969). Ce sont des cartes dites « totalisatrices » indiquant, par classe de diamètre dominant de 10 en 10 cm, les caractéristiques moyennes (surface productive, nombre de tiges et surface terrière) des peuplements avec résineux et feuillus séparés (cf. description du programme). Le critère de diamètre dominant a été pris comme représentant la notion d'âge de façon valable (Horisberger 1969) et plus utile que l'âge descriptif qualificatif (*Bartet, Besson 1968*). Notons enfin que les vides improductifs, même enclavés dans la forêt, sont exclus de la simulation.

Ce raisonnement travaille donc sur des peuplements considérés comme réguliers. Mais les inventaires utilisés sont des inventaires par placette d'échantillonnage de 1 à 5 ares de surface. Les peuplements réguliers en question sont donc des « agrégats » statistiques de placettes de caractéristiques comparables et pas forcément des étendues régulières contiguës. Le modèle s'applique ainsi à toutes les forêts qui ne sont pas jardinées strictement pied par pied. Il s'applique en particulier aux forêts jardinées par bouquet dans la mesure où leur production correspond à celle estimée dans les tables de production.

A l'aide d'une autre option, l'état initial peut être défini à l'aide de classes d'âge de dix ans.

— Fertilité

Elle est préalablement déterminée graphiquement par la relation hauteur dominante, diamètre dominant (Horisberger 1969) et introduite dans le modèle sous la forme de deux classes de hauteur, résineux et feuillus, exprimée en hauteur dominante à 50 ans (Badoux 1966). Signalons que *Moosmayer (1967)* a trouvé en Bade-Wurtemberg une corrélation assurée entre la fertilité et la relation hauteur moyenne — diamètre moyen. D'autre part, *Decourt (1967)* obtient pour le Douglas des corrélations qui laissent penser que la fertilité pourrait s'exprimer en fonction de la hauteur dominante, du diamètre dominant et du nombre de tiges (exprimant la densité)².

— Tables de production

La fertilité ainsi obtenue permet d'entrer dans les tables de production. Les résultats du modèle seront donc limités à la zone de validité de ces tables. Pour les besoins du programme (nécessité de continuité) les données des tables ont été légèrement extrapolées. On a pris l'épicéa (qui représente

² Note: ici le diamètre dominant est la moyenne arithmétique des diamètres des 100 plus gros arbres à l'hectare.

environ deux tiers des résineux dans le canton de Vaud) comme table résineux et le hêtre comme table feuillus (la différence d'accroissement du sapin étant souvent compensée par la différence de prix).

D'autre part, on a tenu compte de certains résultats inédits obtenus sur des placettes d'essai de l'Institut fédéral de recherches forestières suisse (régime d'éclaircie différent en particulier). Enfin, la structure du programme a cherché à tirer parti de la forme sous laquelle figuraient les données des tables. Le modèle pourra donc être utilisé avec des tables de production différentes, pourvu qu'elles puissent se mettre sous la même forme que celles de Badoux.

3.3 Hypothèses de construction

— Hypothèse fondamentale (accroissement)

L'idée de ce modèle de simulation est simple. Elle a été inspirée par les Anglais et les Belges (*Johnston, Grayson, Bradley, 1967; Delvaux, 1968*). Partant de la loi d'*Eichorn* qui dit que l'accroissement total ne dépend pas du traitement, mais nous admettons que cet accroissement se reporte sur les tiges que laisse le forestier.

Nous avons repris cette loi, *mais exprimée en surface terrière: «entre des limites que nous préciserons, la production totale en surface terrière est indépendante du traitement pratique».*

Ceci apparaît dans chaque classe de fertilité sous forme d'un tableau des accroissements annuels en surface terrière Ig par classe d'âge et rapportés à l'hectare. Les valeurs sont tirées des tables de Badoux.

Les avis divergent sur la valeur de cette hypothèse. Mais c'est la plus adaptée à notre problème. Les tables de Badoux indiquent bien que la relation production totale en surface terrière — hauteur dominante ne dépend pas de la fertilité ($\pm 5\%$), mais il s'agit d'un traitement unique. Les tables d'*Assman et Franz (1965)* donnent un intervalle de densité de peuplement à l'intérieur duquel les fluctuations de la production totale sont négligeables à $\pm 10\%$. En Finlande, *Vuokila (1967)* fait apparaître une influence systématique du traitement sur la production, de l'ordre de $\pm 15\%$. Finalement avec *Delvaux (1964)*, nous avons admis que « le type d'éclaircie, de même que l'intensité (pour les degrés admis dans l'expérience) sont sans influence sur la production totale en surface terrière et en volume » à condition que la surface terrière du matériel restant ne dépasse pas certaines valeurs limites.

Nous avons défini un domaine de validité, limité vers le haut par une surface terrière maximum G_{max} que peut atteindre le peuplement et vers le bas par une surface terrière critique G_{cr} au-dessous de laquelle l'accroissement est diminué de façon linéaire. Nous n'avons donc pas fait intervenir de surface terrière optimum, mais seulement un palier (*Johnston, Grayson, Bradley, 1967*).

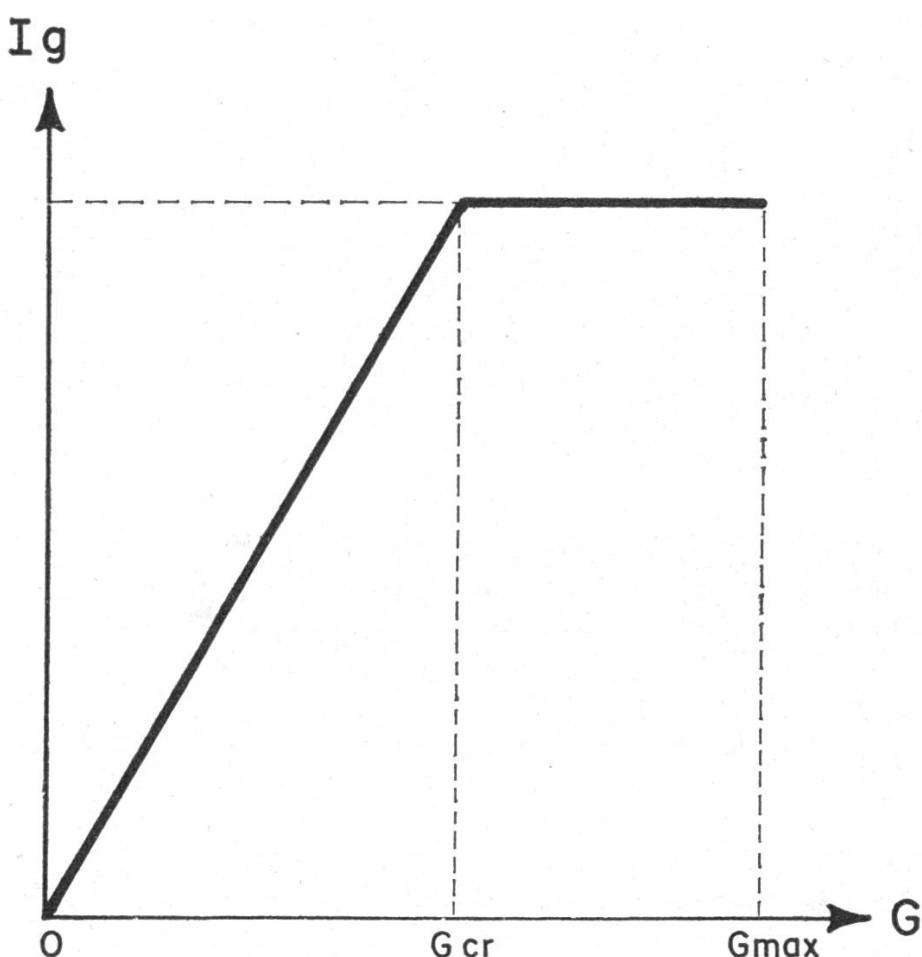


Figure 2: Représentation schématique de la relation entre l'accroissement en surface terrière (I_g) et la surface terrière (G) à un âge donné.

Signalons une étude de *Schober* (1969) qui indique que dans une placette de Douglas fortement éclaircie, où l'on a déjà une perte de 6% de bois fort, on constate que l'accroissement en surface terrière est supérieur de 3% à celui du témoin.

Pour la détermination de G_{max} , nous avons utilisé les résultats d'*Assman* ainsi que quelques données non publiées de l'Institut fédéral de recherches forestières suisse. Pour G_{cr} , nous avons fait un compromis entre les données d'*Assman* et celles des Anglo-Saxons, sur la base de quelques observations faites en Suisse (*Auer, Wieland*, 1968). Faute de disposer de nombreux résultats précis, nous avons préféré simplifier. C'est pourquoi nous sommes partis de la surface terrière des tables de *Badoux* (G_{BX}), à un âge donné et nous avons fait:

$$\begin{aligned} G_{\text{max}} &= 1,5 \text{ } G_{\text{BX}} \\ G_{\text{cr}} &= 0,8 \text{ } G_{\text{BX}} \text{ pour les résineux,} \\ G_{\text{cr}} &= 0,7 \text{ } G_{\text{BX}} \text{ pour les feuillus.} \end{aligned}$$

Ces chiffres sont arbitraires, faute d'avoir à disposition des informations plus précises. Signalons qu'il existe des études préconisant des densités plus faibles (*Smith*, 1963; *Lundgren*, 1965) allant jusqu'à 20 m²/ha (environ 0,6 G_{BX}), avec des essences et des stations différentes il est vrai.

Nous avons été encouragés dans ce raisonnement en surface terrière par la facilité de passage de celle-ci au volume.

En effet, les tables de production de Badoux indiquent que le rapport volume bois fort sur surface terrière, pour un peuplement, est fonction très étroite de la seule hauteur dominante de ce peuplement.

Il semble d'ailleurs (*Decourt*, 1961) que cette relation, pour une essence donnée (l'épicéa), soit remarquablement stable sur une aire très vaste.

— *Hypothèse de mortalité*

Nous supposons que la mortalité intervient chaque fois que l'accroissement amènerait la surface terrière G à dépasser G max. L'effet est alors celui d'une éclaircie non commercialisée qui ramène G à la valeur G max. Lorsque la forêt est éclaircie, nous admettons que la mortalité éventuelle figure dans les éclaircies.

— *Hypothèse de chablis*

Les chablis sont définis séparément de la mortalité engendrée par excès de densité (cf. ci-dessus). Ils sont caractérisés en proportion de la possibilité initiale exprimée en surface terrière. Cette proportion peut être variée pour chaque période de la simulation. Les chablis sont répartis par peuplement selon le rapport de la surface terrière du peuplement à la surface terrière de la forêt entière. Un coût additionnel peut être imputé à la récolte des chablis. S'ils ne sont pas récupérés, leur valeur devient nulle.

— *Hypothèse de mélange*

Le mélange se réduit à résineux et feuillus. Pour exprimer la proportion du mélange, nous avons utilisé la notion de degré de couvert (C) (*Pardé*, 1961) ou rapport entre la surface terrière réelle (G) et celle donnée par les tables de production (G_{BX}). La proportion des résineux dans le mélange est exprimée par ce que nous avons appelé le « facteur d'accroissement résineux » fa_R:

$$fa_R = \frac{C_R}{C_R + C_F}$$

où: $C_R = \frac{G_R}{GBX_R}$ est le degré de couvert des résineux

$C_F = \frac{G_F}{GBX_F}$ est le degré de couvert des feuillus

et $C = C_R + C_F$ est ce que nous appelons le degré de couvert total. Il en est de même pour les feuillus avec fa_F.

Ceci revient à dire que nous considérons deux peuplements poussant côté à côté, que nous ferons croître simultanément de façon indépendante, en proportion de leur facteur d'accroissement. Une croissance inégale peut d'ailleurs agir par la suite sur les facteurs d'accroissements, dans des limites raisonnables.

A notre connaissance, il n'existe pas d'indications pratiques sur le comportement du mélange des essences (Delvaux, 1971). Si « le hêtre est la mère de la forêt », nous n'avions pas d'indications sur les effets de son instinct maternel. Nous l'avons donc fait vivre « comme frère et sœur » avec les résineux en adoptant un système tel que deux peuplements juxtaposés conservent leur importance respective en croissant, ce qui n'est pas le cas si on se contente d'utiliser le rapport des surfaces terrières. En pratique, l'hypothèse de juxtaposition correspond à la réalité: au canton de Vaud, les peuplements mélangés pied par pied en résineux et feuillus formeraient environ 10% de la surface boisée productive, et il ne s'agit alors plus de peuplements « réguliers ».

— *Hypothèse d'âge*

Dans le processus d'aménagement, nous avions pu remplacer la notion d'âge par celle de diamètre dominant (Horisberger, 1969). Les données initiales vaudoises sont donc présentées par types de peuplement définis par le diamètre dominant. Pour la simulation, il fallait réintroduire la notion d'âge, puisque c'est l'intervalle de temps qui est l'unité de base de l'évolution. Nous l'avons fait avec l'hypothèse suivante: le diamètre dominant est indépendant du traitement entre certains extrêmes (Johnston et Bradley, 1964). On peut donc attribuer à un diamètre dominant l'âge correspondant tiré des tables de production. On répartit alors proportionnellement par classes d'âge les surfaces occupées par une classe de diamètre dominant. Cette interpolation n'est effectuée qu'une fois (transformation des données initiales), de sorte que l'hypothèse n'a pas d'importance par la suite. On obtient ainsi le tableau des surfaces $S(i)$ occupées par la classe d'âge i .

(N. B. — Pour les forêts décrites par classes d'âge, une autre routine d'input permet de lire les données directement par classes d'âge de 10 ans.)

— *Hypothèse d'assortiments*

Selon les tables de Badoux pour l'épicéa (1966), il existe une relation étroite entre le diamètre de l'arbre de surface terrière moyenne dg et la proportion des classes d'assortiments définies par Flury (1912). Cette relation est valable pour le matériel sur pied et pour le matériel enlevé en éclaircie. Pour les feuillus aussi, des relations semblables ont été trouvées pour des assortiments définis uniquement selon des critères quantitatifs (Joly et Pleines, 1970). On a admis que les différences de qualité seraient exprimées par les prix unitaires et que l'influence du traitement sur la production des

divers assortiments était reflétée par la variation de la proportion des assortiments en fonction de dg.

3.4 Définition des paramètres de la simulation

Le modèle comprend un grand choix d'options sylvicoles, selon la nature des interventions (soins culturaux, éclaircies, liquidation, chablis et régénération), leur type (par exemple, pour l'éclaircie: éclaircie par le haut ou par le bas), leur poids (éclaircie « forte » ou « faible ») et leur rotation (succession dans le temps). Ces options peuvent être changées pour chaque classe d'âge et pour chaque période d'évolution.

a) Choix de la politique de liquidation durant une période d'évolution:

Six rythmes différents de liquidation (en ha/an) sont à disposition, soit:

- Lo = rythme de la période précédant le début de la simulation,
Ln = rythme normal en situation équilibrée, avec révolution = X années (au choix de l'utilisateur),
Le = rythme nécessaire pour compenser en « X » années le déséquilibre = dans la distribution des classes d'âge,
Lcr = rythme nécessaire pour éviter un vieillissement trop critique,
La = liquidation de tous les peuplements ayant un âge supérieur à un âge d'exploitation donné,
Ld = liquidation de tous les peuplements ayant un diamètre moyen supérieur à un diamètre d'exploitabilité donné.

Pour toutes ces options, la surface à liquider est normalement allouée par ordre décroissant d'âge (c'est-à-dire en commençant par la plus vieille classe d'âge), et en continuant jusqu'à épuisement de la surface à régénérer durant la période d'évolution. Mais, si nécessaire, jusqu'à 4 classes d'âge peuvent être régénérées en priorité (cas des transformations par exemple).

b) Définition du traitement en éclaircies:

Pour chaque classe d'âge et chaque période d'évolution (si nécessaire), pour les résineux et les feuillus séparément, le régime d'éclaircie est défini à l'aide des paramètres « poids », « type » et « rotation » (Delvaux, 1968):

- le poids de l'éclaircie (P_E) est défini à l'aide de la « constante d'éclaircie » (CE), par interpolation linéaire du poids d'éclaircie des tables de production (GE_{BX}), exprimé en surface terrière unitaire ($m^2/ha/an$).

Si: $CE > 1,0$, le peuplement sera éclairci plus fortement que selon les tables de production,

$CE = 1,0$, le peuplement sera éclairci comme dans les tables,

$CE < 1,0$, le peuplement sera éclairci plus faiblement que selon les tables.

En effet: $P_E = CE \cdot GE_{BX} \quad (m^2/ha/an)$

- Le type d'éclaircie (T_E) est caractérisé par \bar{g}_E/\bar{g} , le rapport de l'arbre de surface terrière moyenne enlevé en éclaircie (\bar{g}_E) à l'arbre de surface terrière moyenne du matériel sur pied initial (\bar{g}).
 (N. B. — Le type d'éclaircie peut aussi être défini par interpolation linéaire du type d'éclaircie utilisé dans les tables de production comme pour le poids d'éclaircie. Alors:

$$T_E = RG \cdot (\bar{g}_{EBX}/\bar{g}_{BX})$$
, RG étant le facteur d'interpolation indiqué sur la carte d'éclaircie).
- La rotation est spécifiée par le « moment » de l'éclaircie m (i): c'est le nombre d'années écoulées entre le début de la période d'évolution et le moment de l'intervention. Jusqu'à 3 éclaircies par période peuvent être ainsi spécifiées.
 (N. B. — S'il y a plus d'une intervention par période, la quantité à éclaircir est répartie proportionnellement entre les interventions.)
- Les chablis sont décrits de la même façon que l'éclaircie, à l'aide d'un poids et d'un type spécifique, sauf qu'un même régime de chablis est utilisé pour toutes les classes d'âge (pour le moment).
- Les soins culturaux sont définis par la proportion (%) du nombre de tiges à enlever, par essence et par classe d'âge (jusqu'à 40 ans au maximum).
- Les assortiments sont pour le moment calculés manuellement à l'aide de graphiques exprimant le pourcentage de chaque assortiment dans le matériel sur pied et dans l'éclaircie, en fonction du diamètre de l'arbre de surface terrière moyenne.

3.5 Calculs d'évolution (cf. organigramme)

Ils se font en surface terrière. Nombre de tiges et volumes en sont ensuite dérivés. Les calculs d'évolution débutent après que l'état initial ait été déterminé (« éléments de départ ») et que les éléments de simulation de la période (choix de la politique de liquidation) aient été rassemblés. L'on procède par classe d'âge (i), en commençant par les peuplements les plus âgés, à:

- *Calcul de l'accroissement périodique en surface terrière* pour les résineux (IG_R) et les feuillus (IG_F) (par hectare de peuplement de classe d'âge i): le degré de couvert total (C) pouvant être inférieur au degré de couvert critique total (CCR_T), il y a lieu de tenir compte d'une éventuelle perte d'accroissement. A cet effet, l'on introduit le « facteur de correction de l'accroissement » (K). Il se calcule comme suit:

$$\text{Si } C(i) < CCR_T(i), \begin{cases} K_R(i) = 1 - PR \times [CCR_T(i) - C(i)] \\ K_F(i) = 1 - PF \times [CCR_T(i) - C(i)] \end{cases}$$

$$\text{Si } C(i) \geq CCR_T(i), \begin{cases} K_R(i) = 1 \\ K_F(i) = 1 \end{cases}$$

où: PR = pente de la variation de l'accroissement en surface terrière résineux, en fonction de la densité
 $= 1/0,8$ (cf. hypothèse fondamentale) = 1,25

PF = idem pour les feuillus = 1,43

$$CCR_T(i) = fa_R(i) \times CCR_R + fa_F(i) \times CCR_F$$

avec: fa_R = facteur d'accroissement résineux (cf. hypothèse de mélange)

fa_F = idem pour les feuillus

$$CCR_R = 0,8$$
 (cf. hypothèse fondamentale)

$$CCR_F = 0,7$$

On peut alors écrire:

$$\left. \begin{array}{l} IG_R(i) = K_R(i) \times IBX_R(i) \times L \\ IG_F(i) = K_F(i) \times IBX_F(i) \times L \end{array} \right\} (m^2/ha)$$

où: $IBX(i)$ = accroissement courant annuel en surface terrière de la classe d'âge i (par hectare), selon les tables de production « Résineux » (R) et « Feuillus » (F) respectivement

L = longueur de la période (en principe 10 ans).

— Calcul des interventions:

a) Liquidations

On examine si le peuplement ou une partie du peuplement doit être régénérée, en accord avec la politique de liquidation spécifiée pour la période et en tenant compte d'éventuelles priorités de régénération, on obtient ainsi les surfaces $SL(i)$ à liquider par classe d'âge. On suppose que la coupe définitive a lieu à mi-période.

Les exploitations de la classe d'âge i sont exprimées en surface terrière (GL) et en nombre de tiges (NL). A l'aide du facteur de forme V/G, le volume enlevé (VL) peut ensuite être calculé.

Pour les résineux:

$$\left. \begin{array}{l} GL_R(i) = G_R(i) + 0,5 \times IG_R(i) \\ NL_R(i) = N_R(i) \\ VL_R(i) = GL_R(i) \times VGBX_R(i) \end{array} \right\} \text{valeur à l'hectare}$$

où: $G_R(i)$ = surface terrière réelle/ha des résineux de la classe d'âge i
 $N_R(i)$ = nombre de tiges/ha résineux de la classe d'âge i

$VGBX_R(i)$ = facteur de forme V/G des tables de production résineux, à mi-période (i).

L'on procède de même pour les feuillus. L'on tient compte des chablis prévus, qui sont comptabilisés à part.

$$\text{Liquidation totale} = \sum_i S(i) \times [VL_R(i) + VL_F(i)]$$

b) Eclaircies

Selon les directives d'éclaircies pour la période, l'on examine s'il y a lieu d'éclaircir le peuplement de classe d'âge initiale i . Les exploitations (E) se calculent grossièrement comme suit, pour les résineux (R):

- La surface terrière enlevée en éclaircie est $GE_R(i)$:

$$GE_R(i) = PE_R(i) \times \frac{G_R(i) + m(i) \times \frac{IG_R(i)}{L}}{GBX_R(i) + m(i) \times IBX_R(i)}$$

où: $PE_R(i)$: poids de l'éclaircie, dans la classe i
 $= CE_R(i) \times GE_{BXR}(i)$ (cf. définition du traitement en éclaircie)

la fraction = degré de couvert avant la première éclaircie avec:
 $m(i)$ = moment de l'éclaircie, en années.

- L'arbre moyen enlevé en éclaircie a pour surface terrière $\bar{g}E_R(i)$

$$\bar{g}E_R(i) = TE_R(i) \times \frac{G_R(i) + m(i) \times \frac{IG_R(i)}{L}}{N_R(i)}$$

où: $TE_R(i)$: type d'éclaircie résineux (cf. définition du traitement en éclaircie).

- Le nombre de tiges exploitées en éclaircie est: $NE_R(i)$

$$NE_R(i) = GE_R(i) / \bar{g}E_R(i).$$

- Le volume exploité en éclaircie est: $VE_R(i)$

$$VE_R(i) = GE_R(i) \times VGBX(K), \text{ avec } K = i + m(i)$$

L'on procède de même pour les feuillus. (N. B. — En réalité, l'on tient compte en plus du nombre d'éclaircies à effectuer durant la période *et des chablis*.)

- *Détermination de l'état final*

a) Etat final provisoire

Pour les résineux:

$$G'_R(j) = G_R(i) + IG_R(i) - GE_R(i) \quad \text{où: } j = i + L$$

$$N'_R(j) = N_R(i) - NE_R(i) \quad \text{avec } L = \text{longueur de la période.}$$

b) Mortalité

Si le degré de couvert total (C_j) de la classe d'âge finale j est supérieur au « degré de couvert maximum », $C_{Max} = 1,5$ (cf. hypothèse fondamentale), il y a lieu de déduire une mortalité (M) en surface terrière (GM) et en nombre de tiges (NM).

Pour les résineux:

$$GM_R(i) = fa_R(j) \times [G'_T(j) - G_{Max}(j)]$$

où: $G'_T(j) = G'_R(j) + G'_F(j)$

$$G_{Max}(j) = 1,5 \times [GBX_R(j) \times fa_R(j) + GBX_F \times fa_F(j)].$$

A défaut de renseignements précis, l'on a admis que le « type de mortalité » (TM) correspond au type d'éclaircie des tables de production exprimé par le rapport $\bar{g}EBX / \bar{g}BX$ (cf. définition du traitement en éclaircie):

$$TM_R(i) = \bar{g}EBX_R(j) / \bar{g}BX_R(j).$$

En conséquence, l'arbre moyen enlevé en mortalité ($\bar{g}M$) et le nombre de tiges perdues par mortalité (NM) peuvent être estimés:

$$\bar{g}M_R(i) = TM_R(i) \times [G'_R(j) / N'_R(j)]$$

$$NM_R(i) = GM_R(i) / \bar{g}M_R(i).$$

Après déduction de la mortalité, l'on obtient le nouvel état final:

$$G_R(j) = G'_R(j) - GM_R(i)$$

$$N_R(j) = N'_R(j) - NM_R(i).$$

Et, finalement:

$$V_R(j) = G_R(j) \times VGBX_R(j).$$

L'on procède de même pour les feuillus.

N. B.

1. La mortalité ainsi déterminée est une perte sèche. Elle n'est pas inclue dans la production.
2. L'accroissement en volume se calcule par différence du volume final au volume initial, et non par multiplication de l'accroissement en surface terrière par le facteur de forme:

$$IV_R(i) = VE_R(i) + [V_R(j) - V_R(i)].$$

Dans le cas de peuplements régénérés pendant la période:

$$IV_R(i) = V_R(l) - V_R(i) \quad \text{où } l = i + 0,5 \times L$$

3. La plus haute classe d'âge est composée des peuplements de plus de 150 ans. Pour cette classe d'âge, le nouvel état final est obtenu par pondération de l'ancien état et du « passage » dans la classe. Par exemple, pour la surface terrière:

$$G(j) = G(i) \times W(L) + G(k) \times W(k)$$

où: $G(j) =$ surface terrière finale de la classe d'âge 150 + ans.

$G(i) =$ surface terrière initiale de la classe d'âge 150 + ans.

$G(k) =$ surface terrière du peuplement passant en classe d'âge 150.

$W(i) = S(i) / [S(i) + S(k)],$ où $S =$ surface, en ha.

$W(k) = 1,0 - W(i).$

4. Lorsque la période d'évolution n'est pas égale à 10 ans, il faut procéder de même avec toutes les autres classes d'âge.

3.5 Résultats imprimés

La version actuelle de « sortie » imprime les résultats suivants:

- Etat initial: par classe de diamètre dominant (si nécessaire) par classes d'âge.
- A la fin de chaque période: événements de la période (facultatif) état en fin de période.

La description des différents états consiste en des tables indiquant par classes d'âge:

- la surface (en ha),
- la surface terrière (m^2/ha),
- le nombre de tiges (tiges/ha),
- le volume (m^3/ha).

Ces valeurs sont indiquées pour les résineux, les feuillus et leur somme. Les moyennes pour l'ensemble de la forêt sont imprimées en dernier.

Pour les événements de chaque période, l'utilisateur peut spécifier les résultats qu'il désire voir imprimés (par exemple: accroissement courant, mortalité, chablis, exploitations en éclaircie et en liquidation, degré de couvert, facteur d'accroissement, etc...).

- Récapitulation finale: par période état final détaillé.

En plus de ces résultats, les données initiales, les tables de production utilisées et les cartes de contrôle de la simulation sont imprimées, en guise de documentation. En cas d'erreur dans l'une de ces données, des messages appropriés apparaissent et les calculs sont arrêtés.

3.6 Contrôle du modèle

Afin de tester la cohérence du modèle, nous avons fait une simulation des tables de production de Badoux.

Partant d'une forêt en équilibre composée comme les peuplements de la table de production, nous avons appliqué une sylviculture conforme à celle des tables et nous avons constaté que la forêt restait bien en équilibre. Ceci montre simplement que le modèle construit sur les tables est bien « fidèle».

4. Exemple d'application

4.1 Etat initial

Les forêts communales de Villars-Tiercelin, au Jorat vaudois, ont été inventoriées par échantillonnage en 1966. Leur état d'alors peut être résumé ainsi (en analogie avec les instructions vaudoises d'aménagement):

Tableau 1

Etat initial — 1966 par classes de diamètre dominant (ddom) arbres de plus de 10 cm de diamètre à hauteur de poitrine

Classe (cm)	Surface (en ha)		Surface terrière (en m ² /ha)			Nombre de tiges (nombre/ha)		
	de ddom (1)	«modèle» (2)	en 1966 (3)	Résineux (4)	Feuillus (5)	Total (6)	Résineux (7)	Feuillus (8)
0—10	21	12	0,0	0,0	0,0	0	0	0
10—20	22	8	6,0	4,5	10,5	410	410	820
20—30	31	24	17,7	10,1	27,8	460	460	1190
30—40	33	43	30,0	7,6	37,6	590	240	830
40—50	34	56	35,9	5,3	41,2	430	110	540
50+	31	29	35,1	6,1	41,2	270	80	350
Moyenne	(172)	(172)	27,9	6,3	34,2	454	193	647

Le matériel sur pied était élevé, soit 355 m³/ha (selon le nouveau tarif vaudois, dont 84% en résineux), la fertilité appréciable (hauteur dominante = 20 m à 50 ans pour les résineux, 16 m pour les feuillus). Les exploitations passées se chiffraient en moyenne à 5 m³/ha/an, tandis que l'accroissement annuel moyen était estimé à 8 m³/ha/an.

La régénération était effectuée par petites trouées, avec des plantations denses (10 000 plants/ha), ou par rajeunissement naturel (brousse de hêtre). Faute de soins suivis, le hêtre était envahissant et les perchis très denses.

En 1966, la distribution des classes de diamètre dominant (ddom) était déséquilibrée: comparer les surfaces relevées en 1966 (col. 3 du tableau 1) et celle d'un modèle simple de forêt équilibrée (col. 2), établi pour une forêt équienne d'épicéa et une révolution (très conservatrice) de 120 ans.

La conversion des classes de diamètre dominant en classes d'âge confirme cette constatation (cf. le tableau 2 à la page suivante).

4.2 *Les différentes politiques de gestion simulées et leurs résultats*

4.2.1 *Développement probable en continuant la gestion passée (No 1 sur les graphiques)*

Une première simulation permet d'évaluer comment évoluerait la forêt, si l'on continuait pendant les 50 prochaines années à traiter la forêt comme pendant la moyenne des 30 dernières années, c'est-à-dire:

- en moyenne, 0,9 ha/an de régénération lente, avec plantations denses d'épicéa (10 000 plants/ha) et rajeunissement naturel en hêtre (10%),
- soins culturaux effectués dans les classes d'âge 0 à 30 ans, mais n'enlevant que 30%, puis 20% et 10% des brins feuillus (20, 15 et 10% chez les résineux),

Tableau 2

Etat initial — 1966 — par classe d'âge (arbres de plus de 0 cm de diamètre à hauteur de poitrine. Selon les tables de production du Dr E. Badoux, 1964)

Classe (années)	Surface (en ha)		Surface terrière (en m ² /ha)			Nombre tiges (nombre/ha)			Vol. s/pied (m ³ /ha)		
	d'âge (1)	«modèle» (2)	en 1966 (3)	R (4)	F (5)	T (6)	R (7)	F (8)	T (9)	R (10)	F (11)
110—120	14,4	15,4	35,28	6,14	41,42	246	73	319	526	69	595
100—110	14,3	15,9	35,22	5,98	41,20	297	86	383	507	64	571
90—100	14,3	20,7	36,53	5,42	41,95	361	89	450	508	55	563
80—90	14,4	20,7	35,75	5,28	41,03	443	113	556	472	50	522
70—80	14,3	19,2	33,94	6,19	40,13	519	161	680	411	54	465
60—70	14,3	18,1	31,10	7,76	38,86	576	259	835	336	60	396
50—60	14,3	18,1	29,46	7,23	36,69	789	384	1173	271	46	317
40—50	14,4	12,7	20,89	12,37	33,26	877	771	1648	146	59	205
30—40	14,3	11,8	17,62	10,28	27,90	1310	1483	2793	72	33	105
20—30	14,3	5,8	9,60	12,00	21,60	1138	4055	5193	10	18	28
10—20	14,3	6,6	8,45	1,80	10,25	3360	2865	6225	0	0	0
0—10	14,4	7,1	0,00	0,00	0,00	5930	2701	8631	0	0	0
Moyenne	(172,0)	(172,0)	28,66	6,75	35,41	914	640	1554	337	49	386

N.B.: les différences dans le matériel sur pied proviennent des différents tarifs employés (tarif II vaudois pour l'inventaire, facteur V/G des tables de production pour la simulation);

les différences dans les nombres de tiges et les surfaces terrières proviennent du fait que le tableau no 2 inclut les tiges de 0 à 10 cm de diamètre.

- éclaircies faibles et par le bas, tant pour les résineux que pour les feuillus, tous les peuplements passent en éclaircie une fois tous les 10 ans, jusqu'à leur régénération,
- chablis dus au vent relativement élevés chez les résineux. A priori, on a admis que la proportion de chablis (20%) serait constante durant les 50 ans de la simulation. Les chablis sont récoltés.
En se fondant sur ces hypothèses, l'évolution probable sera la suivante (cf. politique No 1 sur les graphiques):
- La forêt continuera à vieillir. Dans 50 ans, plus de la moitié de la forêt aura plus de 100 ans, les peuplements les plus âgés ayant près de 150 ans. Le matériel sur pied final atteindra 500 m³/ha en moyenne (!), à moins qu'une catastrophe n'intervienne entre-temps...
- La proportion des résineux baisse très peu dans le volume sur pied, mais les feuillus forment un tiers à la moitié du matériel dans les classes d'âge finales de 70 à 100 ans.

- L'accroissement périodique baissera constamment, tant en volume qu'en surface terrière, conséquence du vieillissement. Le niveau absolu est cependant élevé, puisqu'il reste supérieur à $8,5 \text{ m}^3/\text{ha/an}$. Le taux d'accroissement en volume est de 1,9% en moyenne sur 50 ans, mais il passe de 2,7 à 1,7% durant la période de 50 ans.
- Le volume des exploitations oscille (sauf catastrophe probable) autour de $7,0 \text{ m}^3/\text{ha/an}$, avec 84% de résineux. Le volume pris en éclaircie forme plus de 60% des exploitations.

En définitive, cette politique n'est pas réaliste. Elle correspond à une révolution d'environ 200 ans. La capacité de production de la station n'est pas bien utilisée à long terme. Les exploitations trop faibles dans des peuplements denses amèneront à la catastrophe avant 50 ans très probablement.

4.2.2 Développement probable en suivant la politique de l'aménagiste

En 1968, l'aménagiste, ayant reconnu le déséquilibre des classes d'âge, a décidé d'adopter une politique de régénération permettant de compenser en 30 ans ce déséquilibre (politique No 2 sur les graphiques). Ensuite, un rythme normal de régénération a été supposé, fondé sur une révolution de 120 ans. La régénération est artificielle par plantation de 4500 plants/ha, dont 80% de résineux. Les interventions (soins culturaux et éclaircies) suivent le modèle des tables de production (éclaircies fortes et par le haut). Les peuplements de plus de 100 ans ne sont plus éclaircis. Les chablis sont supposés constants (20% des exploitations).

D'après ces hypothèses, l'évolution probable sera la suivante (cf. graphiques):

- Le vieillissement de la forêt est freiné. Dans 50 ans, moins de 30% des peuplements auront plus de 100 ans, les peuplements les plus âgés ayant 130 ans. Le matériel sur pied final aura fortement diminué et sera légèrement inférieur à $300 \text{ m}^3/\text{ha}$.
- La proportion des résineux dans le matériel sur pied baissera à 80%; l'augmentation naturelle du hêtre ne peut être enravée par l'éclaircie.
- L'accroissement périodique en volume baisse fortement à la suite de la liquidation de futaies moyennes.

Au bout de 30 ans, l'accroissement en volume devrait se mettre à augmenter lentement. L'accroissement en surface terrière suit une tout autre évolution, puisqu'il réagit très favorablement à la politique énergique de régénération. A noter que l'effet des plantations de résineux ne se fait pas encore pleinement sentir. Le taux d'accroissement reste supérieur à 2,5% en moyenne. En fin de période, il est même de 2,7%.

- L'évolution des exploitations est « sauvage », avec un sommet très prononcé en première période. Le niveau moyen des exploitations ($10,3 \text{ m}^3/\text{ha}$)

ha/an) est de près de la moitié supérieur à celui de la « politique du passé ». A long terme, il sera possible d'utiliser pleinement la capacité de production. Dans la mesure où le propriétaire peut palier au saut dans les exploitations de la première période, cette politique est favorable à long terme. Elle ramène le matériel sur pied à un niveau raisonnable, diminue le risque de chablis catastrophiques et permet d'utiliser pleinement la capacité de production de la station. Le cas des feuillus reste ouvert, dans la mesure où ils constituent un problème.

4.2.3 Développement probable en admettant que la forêt est « normale »

Une autre simulation (No 3 des graphiques) peut être établie en partant de l'hypothèse souvent faite que la forêt se trouve dans un état « normal ». Il est prévu de travailler par régénération naturelle, avec une révolution de 120 ans. Les éclaircies y sont faibles mais fréquentes et effectuées jusqu'en fin de révolution. On a admis que les chablis seront faibles, mais concentrés sur les gros bois.

Cette politique a les mêmes effets que celle de l'aménagiste, mais d'une façon beaucoup moins marquée. Certes, le matériel sur pied s'élève d'abord jusqu'à 390 m³/ha, mais à la longue il s'abaisse jusqu'à 355 m³/ha. L'accroissement périodique en volume passe de 10,1 m³/ha/an à 8,2 m³/ha/an, tandis que les exploitations restent presque constantes à environ 9,5 m³/ha/an. Cette politique d'éclaircie faible ne paraît pas payante (diminution du diamètre moyen, d'où des gros assortiments).

En définitive, cette politique très modérée ne serait pas trop mauvaise, si:

- la part des chablis pouvait rester aussi faible,
- une proportion de 20% de feuillus dans le volume sur pied était acceptable pour le propriétaire,
- le vieillissement était tolérable (un tiers de la surface finale en futaies de 100 à 130 ans).

4.2.4 Développement probable en « luttant contre le vieillissement futur »

Pour une forêt d'épicéa de la classe de fertilité de Villars-Tiercelin (hdom = 20 m à 50 ans), l'accroissement annuel moyen culmine à 100 ans (9,9 m³/ha/an). Il est intéressant d'évaluer s'il est possible en 50 ans de lutter contre le vieillissement et, si possible, de ramener la révolution à 100 ans, tout en pratiquant des éclaircies fortes et par le haut jusqu'à maturité et créant des plantations pures d'épicéa avec 4500 plants/ha (politique No 4).

Cette politique a un effet radical sur le matériel sur pied, le volume baissant à 270 m³/ha après 50 ans, et la surface terrière moyenne à environ 25 m²/ha. L'accroissement périodique en volume chute de 9,75 m³/ha/an à 7,75 m³ en quatrième période, mais un redressement se dessine en cinquième période. L'évolution de la production en surface terrière confirme cette

remontée probable: elle est en constante augmentation. Les exploitations débutent à 12 m³/ha/an en première période, pour se stabiliser finalement vers 9,6 m³/ha/an.

Dans l'ensemble, cette politique paraît la meilleure des quatre politiques simulées. Elle ramène le capital sur pied à un niveau acceptable, tout en assurant une forêt très productive (taux moyen de production = 2,5%; taux final 2,85%). Les éclaircies ont un effet favorable (diamètre moyen en augmentation, diminution des feuillus médiocres). Pourtant elle n'atteint pas le but espéré, ramener l'âge maximum des peuplements à 100 ans; il subsiste toujours un tiers de futaies de plus de 100 ans...

4.3. Remarques finales au sujet de cet exemple

Les possibilités de la simulation ne sont pas limitées à ces 4 cas. Bien d'autres politiques de gestion pourraient être « simulées » en un laps de temps de quelques secondes par cas et pour un coût minime (moins de Fr. 20.— de frais d'ordinateur pour une simulation de 50 ans...). Dans le cas présent, si la simulation ne permet pas désigner la politique idéale (elle n'a d'ailleurs pas été établie à cette intention), du moins dégage-t-elle clairement les tendances de l'évolution future de la forêt:

- vieillissement plus ou moins marqué,
- chute de l'accroissement en volume, avec rétablissement futur probable,
- nécessaire augmentation temporaire des exploitations,
- augmentation à craindre des feuillus, sans amélioration de leur qualité.

Nous avons limité cet exemple à 50 ans, durée raisonnable mais relativement courte devant une révolution, et qui masque un certain nombre d'effets:

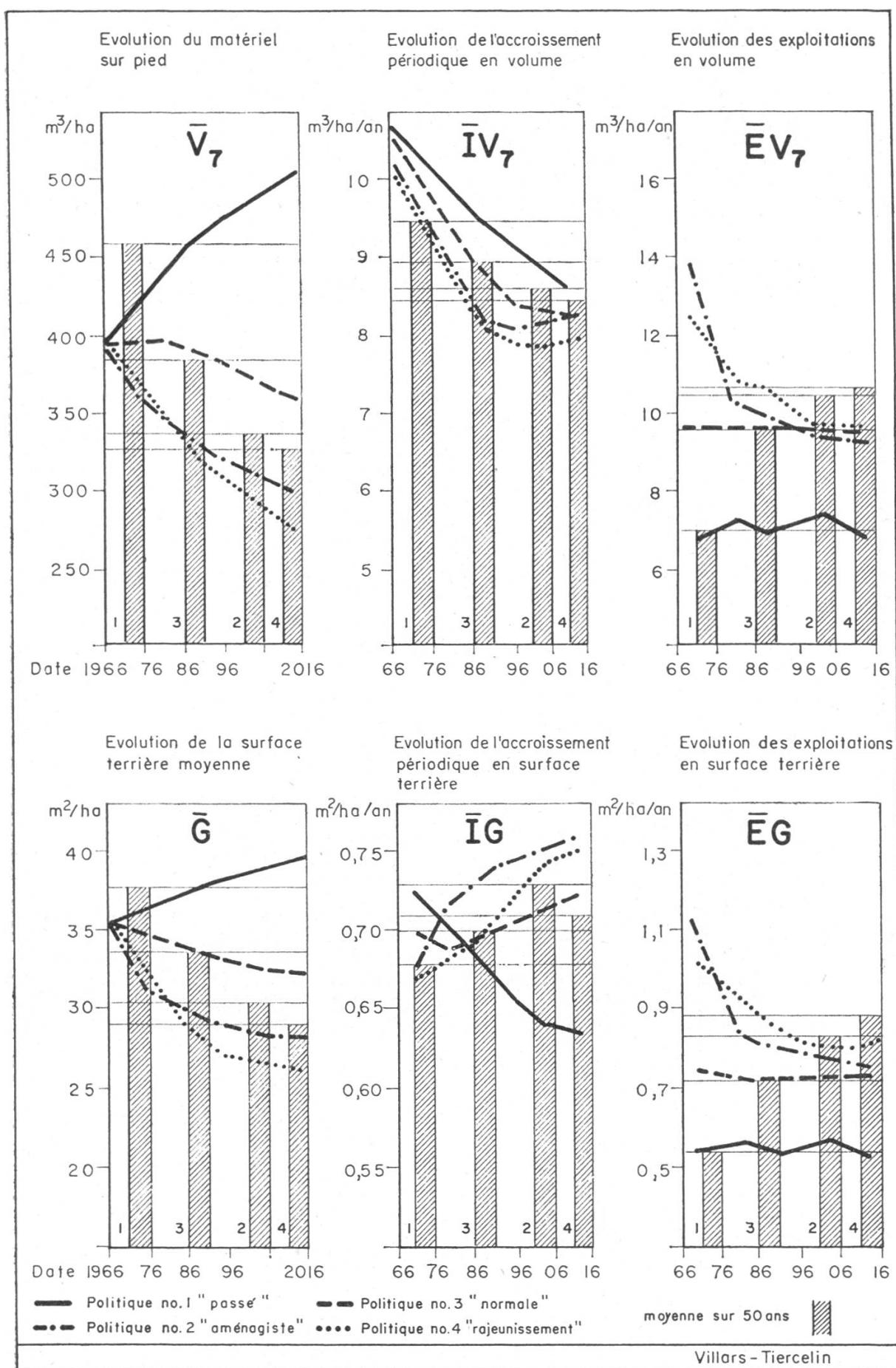
Dans les politiques de liquidation énergique (2 et 4), on obtient une grande surface de jeunes peuplements dont l'accroissement en volume est faible sur la durée de 50 ans. Mais, on constate qu'à l'issue de cette durée, les accroissements en volume des différentes politiques sont très proches et que la tendance semble se renverser en faveur des politiques énergiques. On en a confirmation par l'évolution de l'accroissement en surface terrière.

On constate donc que ces politiques correspondent bien à une réalisation de matériel accumulé, sans atteinte à la capacité de production du capital. On constaterait probablement aussi que l'effet de pénurie consécutif à des exploitations massives est à peu près totalement compensé par l'effet combiné du rajeunissement et des éclaircies fortes.

Il appartient finalement au propriétaire et au gestionnaire de choisir leur politique de gestion parmi celles compatibles avec leurs objectifs à court et long terme.

Résumé quantitatif de l'exemple de Villars-Tiercelin

Paramètre (unité)	Etat initial («1966»)	Etat final («2016») selon la politique				Moyenne sur 50 ans selon la politique			
		No 1	No 2	No 3	No 4	No 1	No 2	No 3	No 4
<i>Matériel sur pied:</i>									
Volume (m ³ /ha)	386	500	297	356	272	452	332	379	327
Surface terrière (m ² /ha)	35,4	39,6	28,4	32,5	25,4	37,8	30,5	33,8	29,2
Nombre de tiges (N/ha)	1554	1667	1455	4379	1274	1629	1574	3216	1355
Proportion résineux (% vol.)	87	83	81	80	86	85	84	84	86
<i>Surface:</i>									
Surface des classes de 100 ans et plus, en % de la surface totale	31	55	28	33	34	—	—	—	—
Classe d'âge la plus vieille (années)	110—120	140—150	120—130	130—140	130—140	—	—	—	—
<i>Accroissement périodique:</i>									
En volume (m ³ /ha/an)	10,4	8,5	8,2	8,2	7,9	9,4	8,5	8,9	8,4
En surface terr. (m ² /ha/an)	0,72	0,64	0,76	0,72	0,75	0,68	0,73	0,70	0,71
Proportion des résineux dans l'accroissement en volume (%)	83	80	80	78	84	81	81	80	82
<i>Exploitations périodiques:</i>									
En volume (m ³ /ha/an)	6,7	6,9	9,1	9,4	9,6	7,0	10,3	9,5	10,6
En surface terr. (m ² /ha/an)	0,59	0,56	0,79	0,76	0,84	0,58	0,87	0,76	0,91
Proportion des résineux dans l'exploitation (%)	86	83	84	85	84	84	84	86	84



5. Développement du système de calcul

5.1. Temps et coût de développement

Le modèle a été conçu en 1968 par J. H. Bartet et L. Auer (Auer, 1969). Sa programmation a été entreprise à temps partiel par W. Pleines en 1969 et 1970. Le système de calcul est opérationnel depuis août 1970, mais diverses modifications ont permis de l'améliorer.

Le tableau ci-dessous résume le temps et le coût nécessité par la mise sur pied du système. Vu les très diverses possibilités d'application du système (cf. § 5.3), il est espéré que l'investissement d'une année de travail sera rapidement amorti!

Tableau 1
Développement du système de calcul «FORSIM»

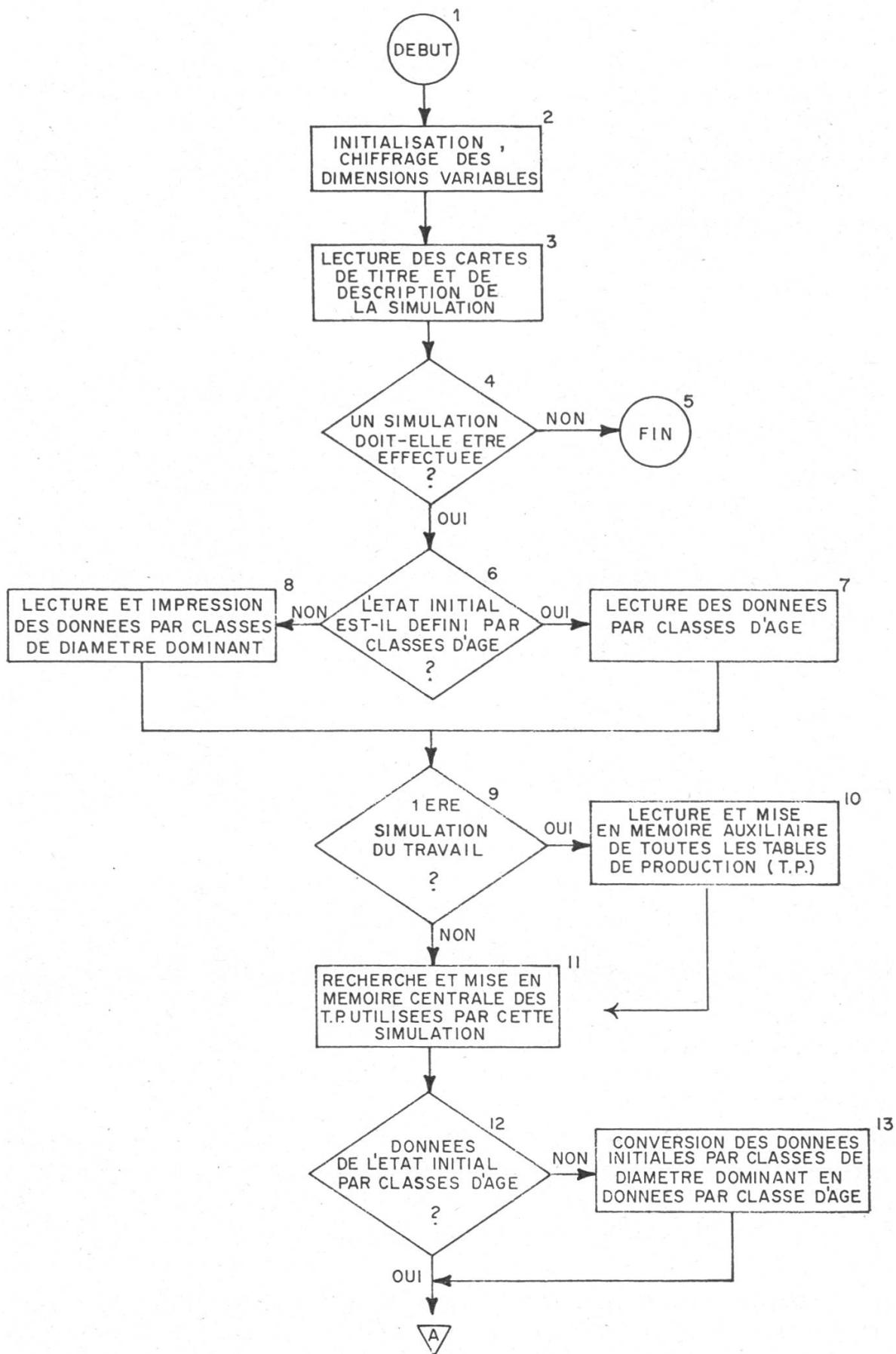
Année	Travail	Nombre de jours	Coût (Frs)	
			Salaires	Calculs *
1968	Revue du problème et conception du modèle	80	8 500.—	—
1969	Programmation et tests	77	12 000.—	1500.—
1970	Etalonnage et modifications	64	13 000.—	3000.—
1971	Tests, exemples et rédaction des publications	30	6 500.—	3500.—
1968/1971	Total	251	40 000.—	8000.—

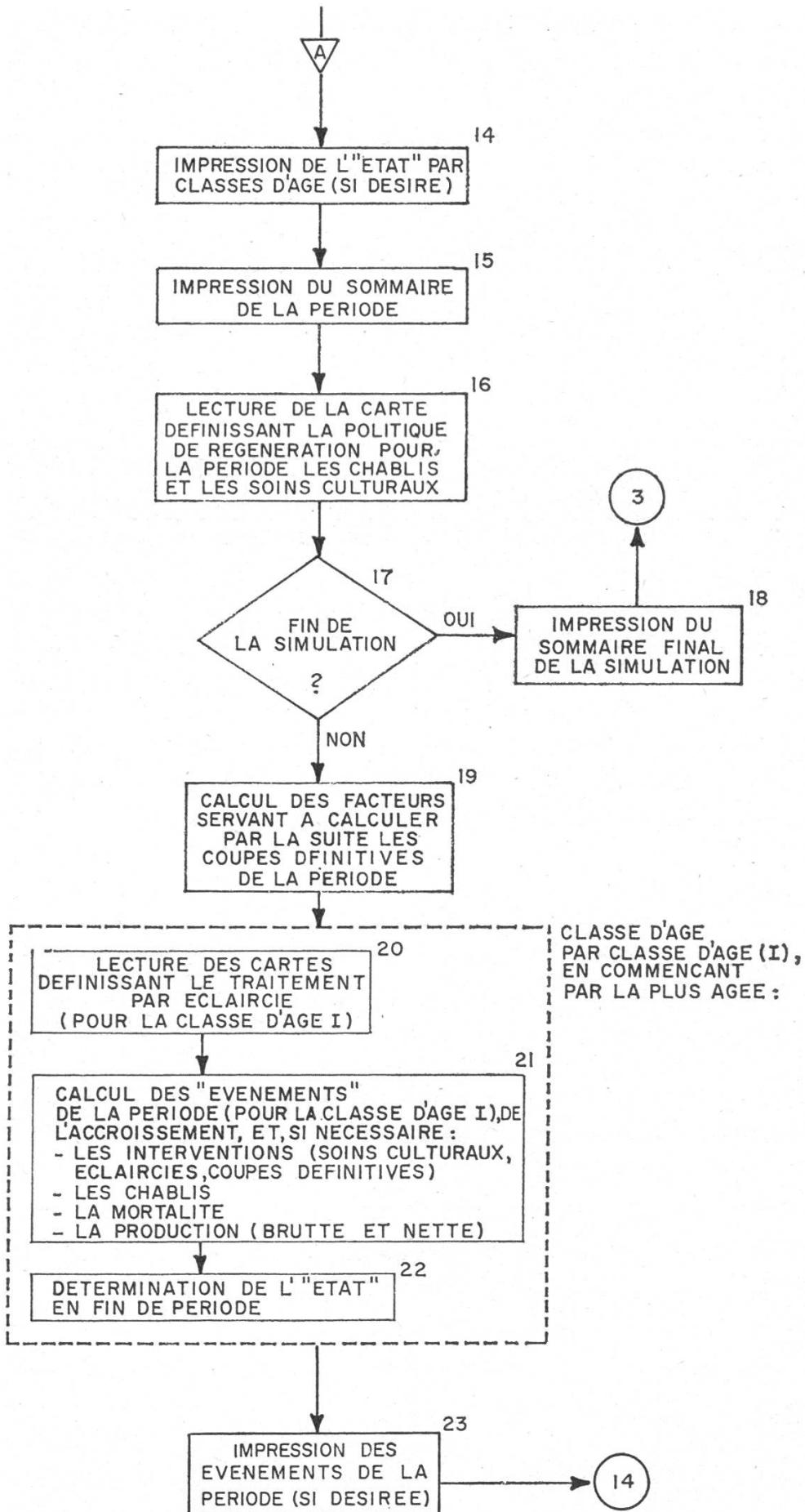
* Les frais de calcul au centre de calcul de l'E.P.F.Z. sont théoriques, ces frais ayant été pris en charge par l'Ecole Polytechnique.

5.2 Aspects de programmation

Le programme de simulation « FORSIM » a été écrit en FORTRAN IV pour l'ordinateur CDC 6400/6500 de l'EPF à Zurich. Il consiste (cf. figures 1 et 3) en 10 routines majeures comprenant environ 9200 instructions FORTRAN. La répartition des modules a été choisie de façon à permettre une éventuelle superposition des routines et à édifier le programme par blocs successifs. Pour le moment, quelque 55 000 positions de mémoire principale à 60 bits sont utilisés à la compilation et environ 48 000 à l'exécution. La répartition des données et résultats intermédiaires en 7 filières (dont 2 filières de mémoire auxiliaire) a été choisie pour faciliter l'utilisation en téléprocessing. Cette configuration peut être modifiée et réduite à 2 filières temporaires et 2 filières d'entrée et de sortie (lecteur de cartes et imprimante).

FIGURE 3 : ORGANIGRAMME DU PROGRAMME DE SIMULATION "FORSIM"





Les données nécessaires (état initial et cartes de définition de la politique à suivre pour chaque période) et les résultats à imprimer sont spécifiés à l'aide de cartes:

- 6 cartes de définition de l'état initial (1 carte par classe de diamètre dominant)
ou 1 carte par classe d'âge
- au maximum, 8 cartes de description et de spécifications
- par période, 4 différents types de cartes de définition: 1 carte « sylviculture », 1 carte « chablis », 1 carte « assortiments » et 16 cartes « éclaircie » (pour chaque classe d'âge).

Ces cartes de définition permettent de faire varier les paramètres de la simulation (état initial, politique d'intervention, durée de la simulation, longueur de chaque période, etc...). Le programme est donc général. Une importante restriction existe pour le moment: le nombre d'essences est limité à deux (épicéa et hêtres). Une brochure à l'intention des utilisateurs est en cours de préparation (Pleines, 1972). Elle contiendra une liste du programme, la définition des routines et de leur contenu, la description des principales matrices, variables et paramètres, la description des différentes cartes de données et d'instructions, ainsi qu'un exemple typique, avec les différentes variantes d'impression des résultats.

Le coût d'exécution des calculs varie selon la durée de la simulation. Il est inférieur à Fr. 20.— pour 5 périodes de 10 ans. Le temps de calcul effectif y est de moins de 20 secondes !

5.3 Application de la simulation

Le modèle a été conçu pour permettre au praticien de prévoir les conséquences futures de ses décisions. Son application primaire est donc à l'échelon local la fixation de la politique de traitement (possibilité, rythme de régénération, régime d'éclaircie, choix des essences). En aménagement toujours, le modèle peut être utilisé pour « mettre à jour » un inventaire: connaissant l'état passé et les exploitations effectuées, on peut calculer l'état actuel (et projeter l'état futur si nécessaire). En remplaçant l'inventaire répété par une simulation, d'importantes économies de temps et de frais peuvent être obtenues, sans que la qualité de la décision souffre.

La simulation est utilisée en aménagement régional pour évaluer différentes politiques d'affectation et prévoir l'évolution future de la production de bois. Une pareille étude est en cours au canton de Vaud.

Le système de calcul peut être utilisé par la formation professionnelle. Un « jeu » d'aménagement permet à différents participants de confronter leurs politiques et de comparer les résultats respectifs. Un premier essai dans ce sens a été tenté en 1971 avec des étudiants du 8e semestre de l'Ecole forestière à Zurich.

Le modèle peut servir à certaines recherches. On pourrait par exemple l'utiliser pour établir des tables de production reflétant différents modes de traitement, par exemple des tables pour l'éclaircie « forte par le haut » et d'autres pour l'éclaircie « faible par le bas ».

La simulation peut également servir à estimer l'influence d'erreurs sur certaines décisions. Il permettra en particulier d'établir de meilleurs plans d'inventaire des forêts.

Enfin, le modèle pourrait être utilisé comme « moteur » dans les applications de recherche opérationnelle (par exemple programmation linéaire) où l'évolution de la forêt a trop souvent été estimée grossièrement.

5.4 Améliorations possibles

- Il serait intéressant d'étendre la simulation à plus de 2 essences.
- Certaines questions dendrométriques méritent d'être, localement, traitées plus à fond (amélioration de la conversion des classes de diamètre dominant en classes d'âge, influence de l'étagement sur la production, influences locales, influence du parcours du bétail ou du traitement en taillis et taillis sous futaie, quantification des facteurs de qualité des bois, meilleures prévisions des pertes par chablis, meilleure définition de la régénération naturelle utilisable, etc...).
- Il faudrait mieux connaître les limites d'application du modèle.
- Les aspects de la « production ligneuse » étant maîtrisés, les incidences financières (frais, revenus, rentabilité, etc...) et techniques (organisation du travail, mécanisation) pourraient être inclus dans la simulation.

6. Conclusion

Dans l'optique initiale du canton de Vaud, ce programme devait avoir deux types d'application.

- Vérification de l'effet des décisions d'aménagement dans le cadre de l'aménagement forêt par forêt ou par groupe de forêt (c'est l'exemple de Villars-Tiercelin).
- Etude des répercussions des politiques forestières possibles à l'échelon régional et cantonal, en particulier sur la commercialisation. (Cette étude est en cours.)

La collaboration de l'Ecole polytechnique fédérale a permis de donner au programme un aspect plus général permettant d'intéresser d'autres utilisateurs:

- Les services forestiers suisses pourraient l'utiliser, la validité des tables de Badoux couvrant le territoire de la Confédération.
- Une application de ce programme a été faite à l'enseignement forestier. Les élèves ingénieurs de l'Ecole polytechnique fédérale ont pu y comparer

les effets de différentes décisions possibles pour l'aménagement d'une forêt.

Ce modèle est transposable à la sylviculture fine d'autres pays, à condition de disposer de tables de production pouvant prendre une forme comparable à celle des tables de Badoux, ce qui est normalement le cas.

Enfin, la construction et le fonctionnement d'un tel modèle ont mis en lumière quelques points clés conditionnés par les progrès de nos connaissances forestières. Ce programme pourrait être un outil permettant à la recherche forestière de définir les secteurs prioritaires où elle peut aider efficacement le forestier praticien.

Zusammenfassung

Das Simulationsprogramm «Forsim» wurde ursprünglich entwickelt, um konkrete, langfristige forstliche Planungsprobleme der Holzproduktion lösen zu können. Es handelt sich beispielsweise um folgende Fragen, die sich im Kanton Waadt stellen: Welche Nutzungspolitik wählen, wenn die Wälder überaltert oder nicht im Gleichgewicht sind? Wie kann man diesen Tendenzen effektiv entgegenwirken, ohne dass zu grosse Schwankungen in den Nutzungen, im Vorrat usw. entstehen? Wie wirken sich die vorgesehenen Massnahmen auf die mittel- und langfristige Holzproduktion aus?

Das bestehende Modell benützt als Ausgangspunkt die Ergebnisse des Waldinventars, während die Ertragstafeln nach Dr. Badoux die Basis für die Berechnungen der zeitlichen Veränderungen («Fortschreibung») bilden. Verschiedene ertragskundliche Hypothesen sind im Modell eingebaut. Die wichtigste ist vom erweiterten Eichhornschen Gesetz abgeleitet und heisst: «Die Produktion an Kreisfläche ist — in einem vom Modell festgesetzten Bereich der Bestandeskreisfläche — unabhängig von der waldbaulichen Behandlung.» Es werden vereinfacht nur «Nadelholz» (Fichte) und «Laubholz» (Buche) ausgeschieden.

Bei der Simulation können verschiedene waldbauliche Behandlungspolitiken ausprobiert werden. Die «Verjüngungspolitik» wird durch die Auswahl der Abtriebbestände, die Umtreibszeit, die Baumartenwahl usw. definiert. Die «Durchforstungspolitik» wird durch folgende Parameter charakterisiert: Gewicht, Typ und Turnus der Durchforstungen und Fallholz. Die Kulturflächen werden der Dichte und Baumartenwahl entsprechend behandelt. «Sterblichkeit» tritt ein, wenn ein Bestand zu dicht wird. Die Länge der zeitlichen Perioden und der ganzen Simulation wird vom Benutzer bestimmt.

Nach einer Darstellung des mathematischen Modelles und des Fortran-IV-Computerprogrammes folgt ein Anwendungsbeispiel: Für die Einrichtung eines Waldes im Kanton Waadt (Villars-Tiercelin, 172 ha) wurden 4 verschiedene Simulationen über 50 Jahre durchgespielt. (Gesamtrechenkosten unter 70 Franken.) Die Ergebnisse zeigen die Vorteile einer energischen Verjüngungs- und Durchforstungspolitik.

Dieses Modell hat nun andere Anwendungsmöglichkeiten, sei es bei der betrieblichen und regionalen Planung (Fortschreibung, Ersatz von teuren Waldinventuren) oder bei der ertragskundlichen Forschung (Aufstellung von Ertragstafeln).