

DES MODÈLES DE PRODUCTION ET D'AIDE À LA DÉCISION SUR SMARTPHONE

JEAN-PHILIPPE SCHÜTZ – CHRISTIAN ROSSET

EXPOSÉ DU PROBLÈME

La famille des modèles sylvicoles SiWaWa a été conçue pour obtenir la meilleure performance prédictive de l'état constitutif et de l'évolution de peuplements pris individuellement, en fonction de données de départ les plus simples et faciles à obtenir. Ces données correspondent essentiellement à la surface terrière et au nombre de tiges par unité de surface. SiWaWa est l'acronyme du terme allemand "Simulation des Waldwachstums", ou simulation de la croissance des forêts. Il s'applique à des peuplements purs et équiennes. Les modèles SiWaWa sont tous construits selon le même mode fonctionnel, indépendant des distances, où la compétition au sein du collectif est caractérisée par un facteur de position sociale, la surface terrière susjacente G_{cum} , c'est-à-dire la somme des surfaces circulaires des arbres plus gros qu'un arbre donné. G_{cum} s'avère être un bon prédicteur des variations de l'accroissement en diamètre en fonction de la densité interne. Cet indicateur s'avère valable aussi bien dans le cas des peuplements irréguliers (Schütz, 1975) que dans celui des peuplements équiennes (Schütz, 2006).

L'objectif de ces modèles est de rendre l'état structurel d'un peuplement concret et sa croissance. Les interventions sont modulables au gré de l'utilisateur. Ces modèles ambitionnent d'être fonctionnellement interactifs, c'est-à-dire que l'utilisateur peut intervenir sur certaines variables de simulation. Ils se prêtent ainsi à l'analyse diagnostique et à l'aide à la décision sylvicole, notamment quant à l'urgence et à la force des interventions à prévoir, en comparant par exemple la situation momentanée du peuplement observé à différentes positions indicatrices de densité (figure 1, p. 428). Ils se prêtent aussi à bien d'autres fins, notamment d'inventaire.

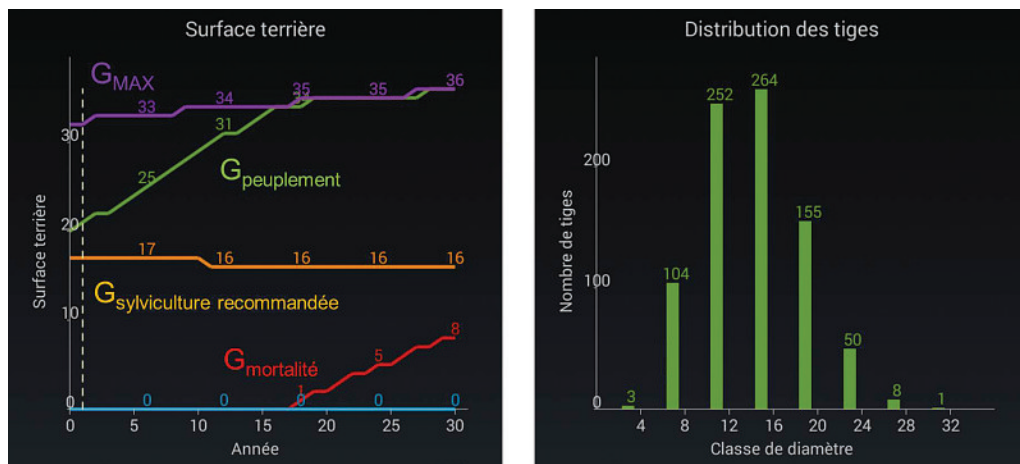
L'évolution des techniques de l'information et notamment le développement des smartphones, aujourd'hui véritables ordinateurs de poche ambulants, rend possible l'application de tels modèles directement au niveau du terrain, là où la décision sylvicole se prend. Cela permet la gageure d'amener l'ordinateur là où il est le plus utile : en forêt même. Un bon modèle permet de simuler et comparer l'effet de différentes trajectoires de traitement et devient ainsi un intéressant outil dans la recherche de solutions les plus appropriées.

L'utilisateur peut visualiser sur l'affichage écran de l'application pour smartphones la position du peuplement en question (cf. figure 1, p. 428) par rapport aux deux références que sont la densité maximale et la courbe de densité correspondant à un régime d'interventions souhaitable (dans ce cas la pratique de l'éclaircie sélective suisse selon Schädelin). Cette courbe directrice est basée sur les parcelles de référence de l'institut de recherche WSL de Birmensdorf soumises à un régime d'éclaircie de type H (éclaircie par le haut) ainsi que sur un grand nombre de parcelles de référence à valeur d'expert de l'ancienne forêt d'enseignement de l'ETH (Zürich). L'utilisateur peut

donc apprécier l'état de densité du peuplement en question, et ainsi définir l'urgence d'une prochaine intervention et son intensité, qu'il peut ensuite introduire dans le module "éclaircies" du logiciel.

FIGURE 1 SORTIE D'ÉCRAN DU SIMULATEUR DE CROISSANCE SiWaWa

À gauche l'évolution sur 30 ans de la surface terrière du peuplement observé par rapport à la densité maximale et la sylviculture recommandée, et également la mortalité intervenant les 30 années depuis le moment observé. À droite sortie d'écran "distribution des tiges" en catégories de 4 cm de diamètre à hauteur de poitrine obtenue sur la base principalement de la surface terrière et du nombre de tiges par hectare.



De surcroît, on peut utiliser certains capteurs des smartphones comme instruments de mesure en forêt, tels que l'optique embarquée pour la mesure d'angles et la mise à disposition d'un rendu visuel performant sur écran (résolution, luminosité, contraste) avec la possibilité d'effectuer des agrandissements d'image. La division des sciences forestières de la haute école spécialisée de Zollikofen a ainsi développé une application pour smartphones permettant la mesure de la surface terrière à l'hectare (G) (selon la méthode de Bitterlich, 1984) ainsi que la mesure du nombre de tiges à l'hectare (N) et la hauteur (h) (voir www.moti.ch). Le smartphone intègre ainsi tout ce dont on a besoin pour l'utilisation de SiWaWa. Le véritable paradigme est ainsi de mettre à disposition du praticien-décideur des simulateurs complexes et performants, aisément compréhensibles, faciles d'accès et d'utilisation.

Le but du présent article est de présenter les fonctionnalités principales des modèles SiWaWa, sans entrer dans tous les détails statistiques de construction, présentés ailleurs (Schütz et Zingg, 2007), et de porter l'accent sur les performances de prédiction. En effet, nous disposons en Suisse d'une excellente base de données de mesures de parcelles de production permanentes (surface moyenne de 0,25 ha), recouvrant une large gamme d'âges, de stations, d'indices de fertilité et aussi de densités qui permettent de déterminer concrètement la fiabilité de prédiction, sur la base de plus de 811 relevés dans le cas de l'Épicéa et de 569 du Hêtre.

FONCTIONNALITÉS PRINCIPALES DES MODÈLES SiWaWa

Les éléments de structure

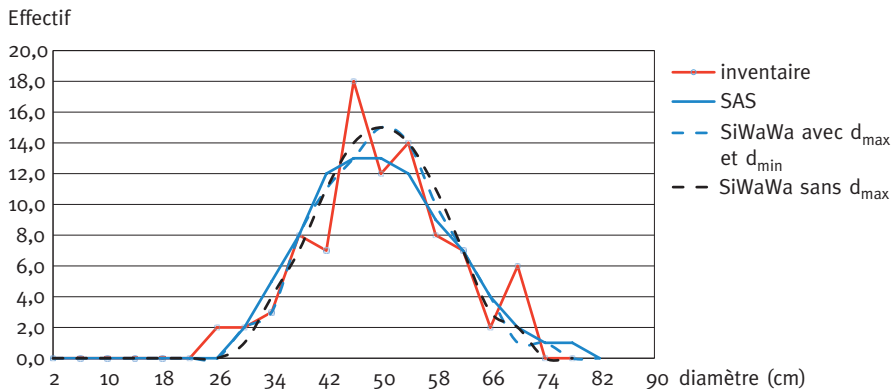
Utiliser la surface terrière comme entrée principale du modèle s'avère intéressant car celle-ci contient en soi aussi bien le potentiel de croissance (*carrying capacity*) que le principal indicateur de

densité structurale (Schütz, 2008) et s'apprête ainsi à une bonne estimation du volume sur pied. Les problèmes liés à la compétition au sein du peuplement peuvent se résoudre autrement que par la connaissance des distances, notamment par la position sociale au sein du peuplement exprimée par la surface terrière susjacente, G_{cum} .

Une des principales réussites de SiWaWa est d'avoir développé une solution performante d'estimation des distributions des diamètres sur la base de la fonction de Weibull (Bailey et Dell, 1973) en partant quasi uniquement de G et N du peuplement principal à considérer. Le principe est d'estimer les trois paramètres de la fonction de Weibull à partir de trois points connus de la distribution : le diamètre quadratique moyen d_g , le diamètre de l'arbre le plus gros d_{max} et le diamètre de l'arbre le plus petit d_{min} ; d_{max} et d_{min} pouvant être introduits directement, ou alors déterminés sur la base de relations empiriques. Comme on le verra plus loin cette méthode donne des résultats plus que probants.

FIGURE 2 EXEMPLE D'ESTIMATION DES DISTRIBUTIONS D'ARBRES (EN CATÉGORIES DE 4 CM) PAR LE MODÈLE SiWaWa

Parcelle d'essai 21-066 du WSL, âge 139 ans, Épicéa. En regard de la distribution réelle (rouge) sont représentées l'estimation par un logiciel statistique (SAS) utilisant la méthode du maximum de vraisemblance (bleu continu), l'estimation selon le modèle SiWaWa simple (c'est-à-dire sur la base uniquement de G et N) (tirets noirs) et l'estimation selon SiWaWa comprenant en outre d_{max} et d_{min} (tirets bleus). Les caractéristiques de ce peuplement sont : $G = 54,3 \text{ m}^2/\text{ha}$, $N = 228/\text{ha}$, $d_{min} = 29,2 \text{ cm}$, $d_{max} = 75,6 \text{ cm}$, $SI = 26$. Les caractéristiques de performance d'ajustement sont : 1) khi-test : 4,52, 4,37, 4,16 trois valeurs hautement significatives; R^2 (coefficient de détermination) : 0,984, 0,969, 0,956 pour respectivement les variantes SAS, SiWaWa sans d_{min} et d_{max} et SiWaWa avec d_{min} et d_{max} ; 2) erreur d'estimation du volume sur pied : - 0,07 %, - 0,3 %, - 0,54 %.



Une fois connue la distribution de diamètres, tous les éléments de structure peuvent être aisément déterminés, pour autant de connaître correctement la troisième dimension, à savoir la hauteur pour chaque arbre. Les hauteurs individuelles (ou par catégorie de diamètre) sont ajustées par une fonction logarithmique simple ($h = \alpha_h + \beta_h \ln(dhp)$) calée à la valeur de d_{dom} du h_{dom} correspondant de l'indice de fertilité (ou SI : *site index*, défini ici comme h_{dom} atteint à l'âge de 50 ans). La formulation de base de h_{dom} selon l'âge (t) est ajustée par une fonction dite de Näslund, fonction hyperbolique à trois paramètres. Ainsi une fois l'indice de fertilité connu, on peut en déduire les hauteurs individuelles et, avec l'apport d'une deuxième variable explicative, améliorer les estimations de volume. Le coefficient β_h est basé sur une relation empirique ajustée statistiquement en fonction de la principale variable exprimant le développement qu'est le

diamètre quadratique moyen d_g . SiWaWa comprend également des équations de détermination du volume de branches (V_b) sur la base des données des publications de Hans Burger « *Holz, Blattmenge und Zuwachs* » (par exemple pour l'Épicéa : Burger, 1953) et en complément pour certaines essences celles de Dagnélie *et al.* (1999, 2013), données qui s'avèrent aujourd'hui très appréciables, alors que l'on utilise de plus en plus de bois énergie.

La figure 2 (p. 429) présente le résultat graphique d'ajustement des distributions des diamètres obtenus par la méthode décrite ci-dessus, en comparaison de celle obtenue par un logiciel statistique connu (SAS) par la méthode du maximum de vraisemblance.

Cet exemple illustre bien la capacité de SiWaWa à estimer de façon très satisfaisante l'état constitutif d'une situation instantanée de peuplement au travers de la distribution des tiges et de l'estimation du matériel sur pied, et montre que SiWaWa se prête bien à des tâches d'inventaires.

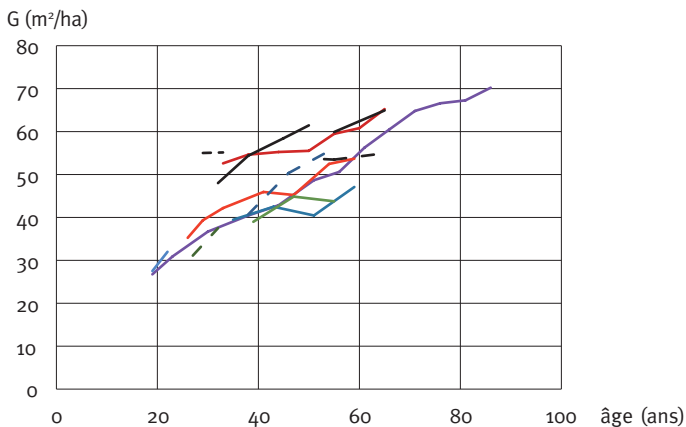
Les références de densité

Il convient d'avoir des références de densité, notamment l'allure de la surface terrière maximale (G_{max}), déterminée d'après Reineke (1933) (Schütz et Zingg, 2010). L'indice de densité (SDI, *density index stand*⁽¹⁾) représente une référence largement reconnue. Nous verrons cependant plus loin que cet indice présente des variations non négligeables (appelées en écologie capacités porteuses, en anglais *carrying capacities*).

En plus d'être un indice de densité, le SDI a évidemment une influence non négligeable sur l'accroissement. En effet, l'étude de plusieurs essais d'éclaircie avec différentes variantes de traitement démontre que le SDI a un effet significatif sur le coefficient α_{id} des fonctions de l'accroissement en diamètre (Schütz et Zingg, 2010).

FIGURE 3

VARIATION DE LA DENSITÉ MAXIMALE DE DIX PEUPELEMENTS D'ÉPICÉA NON ÉCLAIRCIS DEPUIS L'ORIGINE, EN SUISSE, EXPRIMÉE EN SURFACE TERRIÈRE



La fonction de densité selon Reineke (1933) repose sur le fait qu'il existe une relation allométrique générale entre le nombre de tiges (N) et le diamètre quadratique moyen (d_g) qui exprime l'évolution de la densité maximale de peuplements. Cette fonction est indépendante de la fertilité (Schütz et Zingg, 2010). Elle donne ainsi une référence solide pour qualifier l'état de

(1) Plus connu en France comme RDI (*relative density index*).

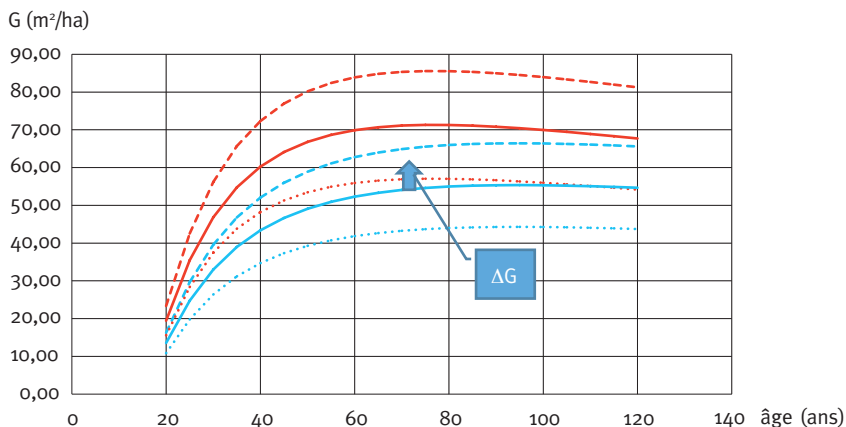
densité par rapport au niveau maximal. Notons qu'avec cette relation entre N et d_g on obtient directement G . Le problème est que la généralité de cette relation est discutable, ou du moins il faut tenir compte de la variation non négligeable des valeurs $N(d_g)$ autour de la moyenne correspondant à une densité maximale, de l'ordre de $\pm 15-20\%$ (figure 3, p. 430) (Schütz, 2008). Le fait que cette variation se manifeste aussi localement, notamment dans les régions à topographie contrastée, demande qu'elle soit estimée au niveau du peuplement, notamment pour tout ce qui a trait aux interrelations en rapport avec la densité.

SiWaWa comprend une méthode originale et relativement fiable de détermination du niveau de production en estimant la portion de surface terrière due au passé sylvicole du peuplement (ΔG , voir la figure 4, ci-dessous) établie sur la base des résultats de nombreux essais d'éclaircie avec variante nulle (non traitée ; Schütz, 2016). ΔG dépend fonctionnellement de la densité maximale moyenne c'est-à-dire ($G_{\text{actuel}}/G_{\text{max moyen}}$) et de l'indicateur $(d_{\text{dom}} - d_g)/d_g$ ou amplitude relative entre le diamètre dominant et le diamètre quadratique moyen avec une fiabilité statistique exprimée par le coefficient de détermination R^2 de 0,703 pour l'Épicéa, 0,758 pour le Hêtre, 0,888 pour le Frêne, 0,411 pour le Chêne, 0,800 pour le Pin et 0,820 pour le Douglas. Ajouté à la surface terrière effective et divisé par la valeur correspondante de $G_{\text{max moyen}}$ on obtient le niveau de production ou facteur de correction de $G_{\text{max moyen}}$ pour donner la juste référence de densité (SDI).

On notera que pour les estimations de l'état constitutif (volume sur pied par exemple), le niveau de production est compris implicitement quand on utilise la surface terrière comme variable d'entrée. Par contre, le niveau de production est indispensable pour connaître les rapports de densité effectifs, comme le facteur de plénitude (SDI) et ses effets sur l'accroissement.

FIGURE 4 EFFET DU NIVEAU DE PRODUCTION SUR LES RAPPORTS DE DENSITÉ

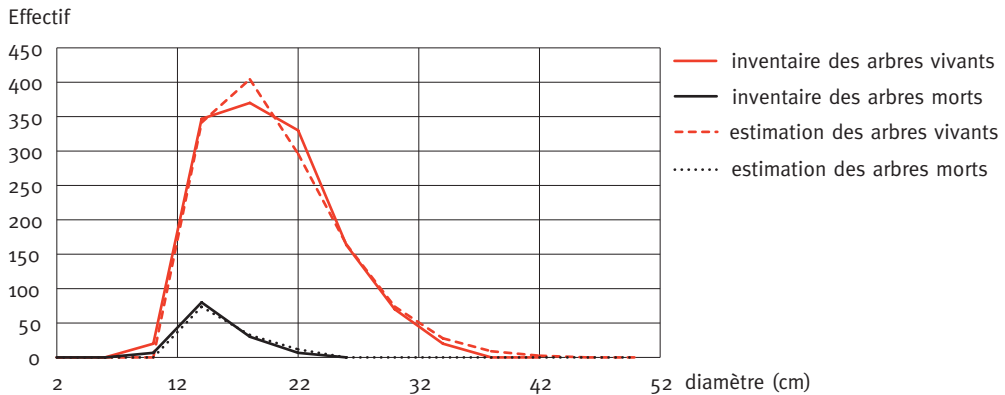
Les courbes bleues montrent le cadre de variation de G dans le cas de la densité proposée pour un traitement représentatif (éclaircie sélective suisse, présentant une valeur moyenne de SDI de 0,75) en fonction du niveau de production, en admettant une variation de $\pm 20\%$ représentée par des courbes en traits discontinus. Les courbes rouges délimitent la variation de la densité maximale en fonction du même niveau de production. Ces deux domaines se recouvrent partiellement. En effet la densité maximale pour un faible niveau de production (courbe rouge pointillée) est à peu près au même niveau que la courbe moyenne des peuplements éclaircis (courbe bleue continue).



Un effet accessoire de la relation de densité est qu'elle permet de déterminer la mortalité naturelle due notamment à l'effet de promiscuité faisant que les arbres socialement les plus bas se font évincer naturellement par la surcompétition à partir d'un certain seuil de densité (G_{max}). En réalité ce ne sont pas seulement les plus petits qui disparaissent de cette façon comme le montre

l'observation de plusieurs parcelles non éclaircies (exemple à la figure 5, ci-dessous). SiWaWa tient compte de ces deux facteurs pour déterminer la mortalité, à savoir le dépassement de la densité maximale et la distribution correspondante des arbres.

FIGURE 5 MORTALITÉ DES ARBRES DANS UNE PARCELLE DE PIN SYLVESTRE NON TRAITÉE
Parcelle 157-2, relevé 1984, âge de 49 ans



L'accroissement radial, facteur déterminant pour la simulation anticipative du développement

Savoir dans quelle mesure l'accroissement est une grandeur nécessaire à obtenir au niveau des peuplements est un problème pertinent. Évidemment, l'accroissement en volume total est une grandeur importante au niveau du massif forestier pour analyser le rendement soutenu et définir la possibilité. Au niveau du peuplement, l'accroissement momentané en volume (accroissement courant) n'a cependant qu'une importance assez relative. Par contre, il convient de disposer de variables permettant la simulation du développement notamment de la surface terrière. C'est donc l'accroissement radial en diamètre (i_d) qu'il est intéressant de bien estimer.

L'étude de l'accroissement en diamètre est délicate car il y a une variation considérable des conditions atmosphériques du moment (ou de la période d'observation) sur l'accroissement et de surcroît, on constate une augmentation systématique linéaire à long terme due aux changements des conditions de croissance (Zingg, 1996 ; Pretzsch *et al.*, 2014). Comme le montrent les séries dendrochronologiques, la variation annuelle de l'accroissement radial est de l'ordre de $\pm 40\%$ (Schütz et Zingg, 2007). Seule une fonction d'accroissement neutre, c'est-à-dire libérée des variations climatiques à court et long terme, est applicable pour une prévision, à moins que l'on s'intéresse à simuler l'effet des variations climatiques.

SiWaWa utilise comme estimateur de l'accroissement radial une fonction à trois paramètres, avec comme principale variable indépendante G_{cum} caractérisant la position sociale des arbres. Comme il se doit pour un modèle dit fonctionnel, il convient non seulement que les fonctions de croissance soient interdépendantes notamment des conditions de densité, mais encore que les paramètres aient une signification biologique. La fonction de croissance est la suivante :

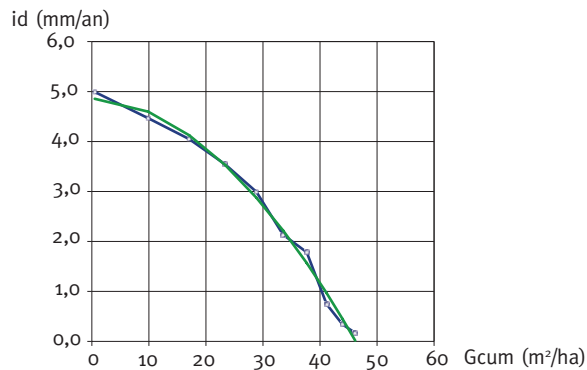
$$i_d = \alpha_{i_d} + \beta_{i_d} G_{cum}^{\gamma_{i_d}} \quad (\text{voir figure 6, p. 433})$$

α_{i_d} représente l'accroissement en diamètre des arbres dominants du peuplement (croisement avec l'axe des y à la valeur $G_{cum} = 0$, soit la position des plus gros arbres) ; β_{i_d} est étroitement lié

au point d'extinction total de l'accroissement (croisement avec l'axe des x) et γ_{id} rend la forme de la diminution de l'accroissement avec la baisse du statut social. Les 3 paramètres sont ajustés avec pour variables explicatives, l'indicateur de densité SDI ou G/d_g comme indicateur du niveau de production pour le paramètre α_{id} , G (parfois G_{max}) pour la variable β_{id} et d_g ou t pour la variable γ_{id} . On notera que le paramètre α_{id} est libéré de l'effet des variations périodiques dû au climat par un indice dendrochronologique (voir pour le détail : Schütz et Zingg, 2007), de manière à rendre un accroissement valable pour des conditions climatiques moyennes, et ajusté à une date donnée (en l'occurrence l'an 2020) pour tenir compte des effets à long terme.

FIGURE 6 **EXEMPLE DE L'ALLURE TYPIQUE DE L'ACCROISSEMENT EN DIAMÈTRE (i_d) EN FONCTION DE G_{cum} D'UNE PARCELLE D'ÉPICÉA (n° 21-266 Attalens, accroissement à l'âge de 93-97 ans)**

Un G_{cum} proche de 0 correspond aux arbres dominants du peuplement ; un G_{cum} élevé, aux arbres socialement les plus bas.



Cette formulation de l'accroissement présente l'avantage par le biais du paramètre α_{id} de pouvoir simuler des variations climatiques supposées ou réelles. Le modèle peut donc être considéré comme effectivement réactif aux conditions climatiques.

Les interventions d'éclaircie

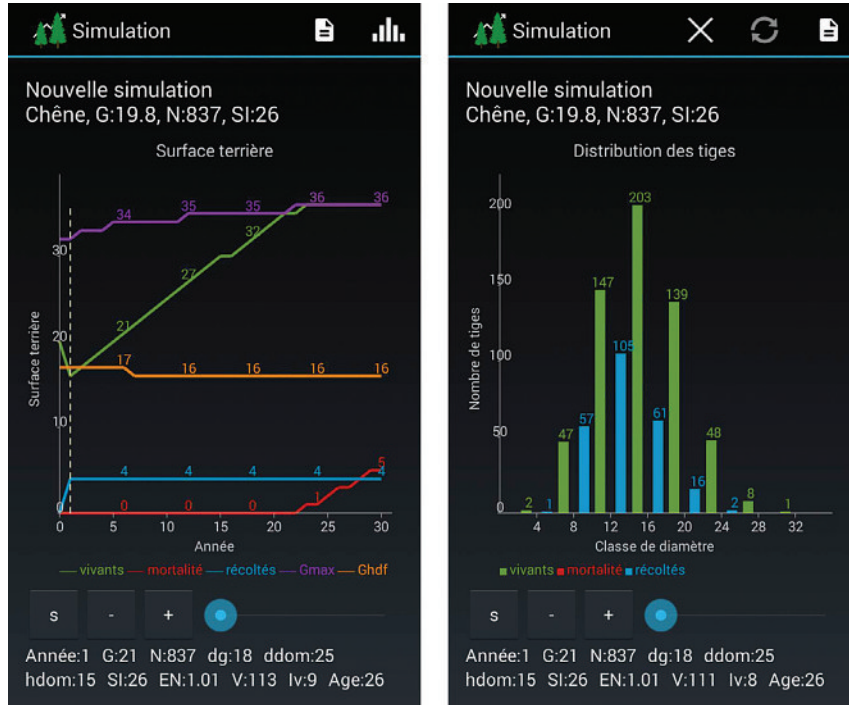
Une des demandes de la pratique est de pouvoir estimer correctement les interventions soit dans le cadre de prévisions préalables, soit sur la base de martelages effectués. L'expérience montre que la pratique des éclaircies peut varier sensiblement selon les intervenants, aussi bien en intensité que dans leur genre (rapport des arbres éliminés à ceux du peuplement restant). De surcroît les concepts d'éclaircie peuvent changer assez notablement au cours des années (Schütz, 2015). La structure du modèle SiWaWa axée sur les distributions d'arbres permet de tenir compte de ces variations de conception des interventions. Cela donne au modèle une souplesse adaptative et permet l'application d'analyse d'interventions à des fins de formation. La figure 7 (p. 434) illustre comment l'utilisateur interagit avec le modèle pour moduler les éclaircies dans le temps et en intensité d'intervention. Il peut jouer avec le modèle et voir les conséquences des interventions.

Le facteur le plus solide de caractérisation des interventions est le diamètre quadratique moyen des arbres éliminés (d_{ge}) car il se trouve au centre géométrique de la distribution des interventions.

FIGURE 7

SORTIE ÉCRAN AVEC UN EXEMPLE D'ÉCLAIRCIE

Le moment de l'éclaircie est introduit par l'utilisateur en cliquant sur l'interface de gauche (ici à une année après le moment du relevé de départ). La force (l'intensité) de l'éclaircie se règle par le curseur en dessous des graphiques. À droite le module de distribution des tiges par catégories de diamètre (4 cm) du peuplement avant éclaircie et de l'intervention (en bleu).



On le détermine à l'aide du coefficient de Hiley, 1956 (parfois aussi appelé coefficient de Johann ou de Magin, qu'est le rapport de d_{ge} et d_g du peuplement avant l'éclaircie). Le coefficient de Hiley (HIL) est une caractéristique propre du sylviculteur-marteleur. Il peut être vérifié, respectivement déterminé, sur la base de résultats de martelages. À défaut SiWaWa utilise une valeur de d_{ge} en fonction de d_g du peuplement basée sur une relation empirique statistique pour chaque essence et définit une distribution des arbres éliminés avec une fonction de Weibull en tenant compte en outre des d_{max} et d_{min} des arbres éliminés ($d_{maxe} = 0,8 \times d_{max}$ du peuplement et $d_{mine} = d_{min}$). SiWaWa détermine ainsi la distribution des tiges à éliminer, leur volume et (dans une version non encore implémentée dans la version pour smartphones et tablettes) les assortiments, les revenus de vente des bois et les frais d'exploitation. La détermination des assortiments se calcule sur la base des fonctions de $d_{relatif}$ et $h_{relatif}$ (les coefficients de décroissance de la forme de la tige) élaborés à partir des données de Dagnélie *et al.* (1999).

FIABILITÉ DES MODÈLES SiWaWa

Ce qui va finalement compter pour l'utilisateur sera la fiabilité prédictive des modèles, au-delà de la structure fonctionnelle propre, aussi élégant que soit son système de résolution. Il est rela-

tivement aisé quand on dispose de suffisamment de mesures de références (parcelles permanentes de production) de quantifier les différentes erreurs d'estimation.

Estimation de la surface terrière

SiWaWa utilise essentiellement la surface terrière comme variable d'entrée. Sa détermination pratique à l'aide du logiciel MOTI est plus performante même qu'avec le télérelascope de Bitterlich en raison essentiellement d'une meilleure appréciation des arbres limites grâce au zoom et la bonne luminosité-écran des smartphones, comme le démontrent les tests effectués par la haute école des sciences agronomiques, forestières et alimentaires de Zollikofen (voir le rapport final MOTI sur le site www.moti.ch).

Piqué *et al.* (2011) et aussi Hébert *et al.* (1998) démontrent que les relevés à angle constant au relascope (Bitterlich) s'avèrent très fiables. Selon ces auteurs, l'erreur dans le cas de peuplements épiennes devrait être aux environs de 2 %.

Estimation du volume sur pied

Générer une liste des diamètres à partir des données de G et N représente dans le modèle SiWaWa la base de détermination du volume et des variables associées (Gcum par exemple exprimant la densité interne). C'est donc une partie essentielle du modèle.

On a vérifié la fiabilité de distribution des diamètres par le coefficient de détermination (R^2) de chaque ajustement, de deux sous-ensembles de 811 parcelles suisses de production d'Épicéa du WSL (Birmensdorf) et 569 de Hêtre. Sont comparés ainsi les diamètres inventoriés à ceux obtenus par trois modèles d'ajustement : 1) l'ajustement par un modèle statistique usuel (SAS) utilisant les procédures classiques d'ajustement par maximum de vraisemblance et 2) et 3) les deux variantes de SiWaWa, la première ne considérant que G et N comme entrées et la seconde en introduisant la mesure des variables d_{\max} et d_{\min} . Par ailleurs on a effectué un test de χ^2 sur les distributions de ces trois modèles en catégories de diamètre (de 4 cm) par rapport à la distribution réellement inventoriée. Le tableau I (ci-dessous) présente les résultats de ces tests qui démontrent une bonne fiabilité d'ajustement.

TABLEAU I **Fiabilité d'ajustement de distributions de diamètres
généérées par trois méthodes différentes :
un logiciel statistique (SAS) par ajustement avec le maximum de vraisemblance
et les deux méthodes utilisées par SiWaWa**

| | Indicateur de bon ajustement | | |
|--|------------------------------|---------------|--------------------------------------|
| | SAS | SiWaWa simple | SiWaWa avec d_{\max} et d_{\min} |
| R^2 moyen sur 811 parcelles d'Épicéa | 0,991 | 0,974 | 0,979 |
| R^2 moyen 569 parcelles de Hêtre | 0,975 | 0,969 | 0,970 |
| % du nombre de parcelles où le test de χ^2 a une valeur inférieure à la limite significative de 95 % (Épicéa) | 88,4 | 60,1 | 63,4 |
| % du nombre de parcelles où le test de χ^2 a une valeur inférieure à la limite significative de 95 % (Hêtre) | 86,5 | 82,8 | 82,1 |

Pour la détermination du volume des arbres sur pied (volume bois de tige, V_s) SiWaWa utilise, essence par essence, des équations à deux entrées (d et h) qui permettent une estimation du volume avec un écart type moyen de $0,08 \text{ m}^3$ (R^2 de $0,998$) sur la base des données de l'institut de recherches de Birmensdorf (WSL) de mesures de volume des arbres abattus en sections de 2 m , ainsi que de la détermination des branches par pesées. Elle comprend par exemple $15\,285$ mesures de volume dans le cas de l'Épicéa ($8\,295$ du Hêtre, 598 du Frêne, $1\,809$ du Chêne, $1\,637$ du Pin et 598 du Douglas). Le cas échéant, notamment quand la base de données WSL ne recouvre pas certaines dimensions (gros bois de Frêne, de Douglas par exemple), on utilisa en complément pour l'ajustement des fonctions précitées les valeurs de Dagnélie *et al.* (1999, 2013). Les erreurs sur l'estimation du volume sur pied ainsi obtenues sont en moyenne de $1,3 \%$, $2,3 \%$, $2,2 \%$ pour les trois modèles d'ajustement cités ci-dessus dans le cas des 811 placettes d'Épicéa et dans le cas des 569 placettes de Hêtre de $1,9 \%$, $2,7 \%$ et $1,5 \%$. Pour le diamètre dominant (d_{dom}), les erreurs sont de $1,5 \%$, $2,6 \%$ et $2,5 \%$ pour l'Épicéa et $2,4 \%$, $2,6 \%$, $2,5 \%$ pour le Hêtre. Il s'agit donc dans ces cas des erreurs liées au modèle lui-même (sans compter l'erreur sur l'indice de fertilité).

Effet de l'indice de fertilité (SI)

Le volume des arbres est défini par une fonction à deux entrées (d et h) où h est dérivé principalement de h_{dom} et de l'indice de fertilité. À défaut, le SI peut être déterminé par une clé en fonction des unités phytosociologiques (Keller, 1988 par exemple) ou encore être repris des documents d'aménagements et de gestion.

À l'erreur du modèle lui-même doit donc s'ajouter celle de l'estimation du SI. Or les hauteurs d'arbres d'un peuplement présentent une variation plus large qu'on ne le croit d'habitude. Un test effectué sur 178 séries de relevés de hauteurs de parcelles de production d'Épicéa révèle un écart type de distribution des hauteurs dans le domaine de d_{dom} (défini ici comme les 15 plus gros arbres dont on a mesuré la hauteur) de l'ordre de $1,64 \text{ m}$ en moyenne et de $1,54 \text{ m}$ pour le Hêtre sur 292 séries de relevés. L'erreur statistique serait donc de $3,2 \text{ m}$ (respectivement $3,1$ pour le Hêtre) ou en gros 13% de moyenne des SI. Cela signifie qu'il faut un nombre suffisamment élevé de mesures de hauteurs pour déterminer correctement h_{dom} et donc SI. Par exemple avec 5 mesures de hauteurs pour déterminer h_{dom} l'écart type de la moyenne dans le cas de l'Épicéa serait ainsi de $0,73$ et l'erreur de $1,46 \text{ m}$. Une telle erreur sur SI donne avec le modèle SiWaWa une différence de 8% en moyenne sur le volume sur pied.

L'erreur totale sur l'estimation du volume peut être estimée comme suit. En admettant 2% d'erreur sur la mesure de G , $2,3 \%$ celle du modèle et 8% du volume (quand on mesure 5 arbres pour déterminer le SI) on obtient une erreur totale de $8,6 \%$ en sachant que c'est la racine carrée de la somme des variances qu'il faut compter. Quand on mesure 15 arbres pour déterminer le SI, l'erreur sur l'estimation de SI devient $0,42 \text{ m}$ soit $2,2 \%$. L'erreur totale d'estimation du volume sur pied s'abaisse très sensiblement à $3,8 \%$. On voit donc que la bonne estimation du SI devient prépondérante.

IMPLÉMENTATION ET DÉVELOPPEMENTS POTENTIELS

Une première version de SiWaWa (Version 01) a été implémentée sur PC et dans l'application pour smartphones et tablettes. La version PC est téléchargeable sur le site www.siwawa.org et l'application MOTI sur le site www.moti.ch. La version initiale a été développée pour trois essences : Épicéa, Hêtre et Frêne. Le système de fonctions a été paramétrée sur la base de nombreux relevés de placettes dendrométriques d'une surface moyenne d'environ $0,25 \text{ ha}$ de

l'institut de recherches forestières de Birmensdorf (WSL) relevées à de nombreuses reprises (jusqu'à 12 fois) (Épicéa $N = 810$, Hêtre = 670, Frêne = 70). En complément on utilisa des parcelles de l'ancien institut de sylviculture de l'ETH (à Zürich), quelques essais d'éclaircie et pour le bon calage des fonctions de densité (Reineke) des données des parcelles permanentes de forêts vierges de l'institut de sylviculture de Zvolen en forêts vierges de Hêtre et Épicéa slovaques, ainsi que celles de l'institut de sylviculture de Zagreb pour les parcelles de forêts vierges de Frêne en Croatie.

Une version o2 pour smartphones et tablettes est opérationnelle depuis octobre 2016 comprenant en plus des trois essences mentionnées le Chêne, le Pin sylvestre et le Douglas, ainsi que la possibilité d'inclure d_{\min} et d_{\max} .

Les modèles SiWaWa valent en principe pour des peuplements équiennes monospécifiques, car leurs fonctions ont été paramétrées à partir de parcelles dendrométriques de ce type. Une application à des peuplements mélangés par petits collectifs (groupes, bouquets) est évidemment possible en dissociant les estimations en sous-ensembles. C'est d'ailleurs la forme la plus courante de mélanges en Suisse en tous cas. Dans le cas de mélanges plus intimes et des mélanges verticaux, la structure conceptuelle des modèles fondée sur les distributions permet une extension d'application, pour autant que l'on relève séparément au départ la surface terrière des essences et leurs limites de hiérarchie sociale (d_{\max} , d_{\min}). Cette condition prévaut d'ailleurs pour tous les modèles de mélanges dans la mesure où l'emplacement social des essences associées peut varier considérablement et importe plus pour la croissance que n'importe quel critère de densité ou de fertilité. Un modèle mixte combinera les fonctions des essences en présence dans le contexte de densité et de position sociale de l'ensemble du peuplement.

En principe, des modèles applicables aux peuplements de structure irrégulière par pieds d'arbres (peuplements jardinés) partent aussi de la distribution des tiges, que ce soit pour l'estimation de l'état de constitution (volume sur pied) ou à des fins de contrôle de l'équilibre de structure (Schütz, 1975) par rapport à la situation optimale dite équilibrée. Un modèle partant de la surface terrière et vraisemblablement du N de base (catégorie la plus basse inventoriée, par exemple de 10 cm) pourrait s'envisager pour compléter la gamme des modèles SiWaWa.

CONCLUSIONS

Les principes de la vie artificielle, mouvement intellectuel fondé par Langton (1989), et dont le but est de trouver des solutions simples à des problèmes complexes, s'appliquent parfaitement à l'esprit des modèles SiWaWa. De surcroît la technologie informatique actuelle permet de rendre disponibles facilement pour le praticien des informations dendrométriques multiples élaborées sur des bases solides et larges, parfois complexes. Cela permet de mieux étayer la connaissance des peuplements, la prise de décision sylvicole sur des bases objectives et ainsi valoriser le travail essentiel du forestier sylviculteur.

Jean-Philippe SCHÜTZ
 Professeur émérite de sylviculture ETH-Zurich
 Brüggläcker 37
 CH-8050 ZÜRICH (SUISSE)
 (jph.s@bluewin.ch)

Christian ROSSET
 Professeur de sylviculture
 et de planification forestière
 Haute école spécialisée bernoise
 Länggasse 85
 CH-3052 ZOLLIKOFEN (SUISSE)
 (christian.rosset@bfh.ch)

Remerciements

Nous remercions vivement le groupe production forestière de l'institut de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL) de Birmensdorf et notamment Monsieur A. Zingg pour la mise à disposition de sa base de données de production qui a permis de calibrer les principales fonctions des modèles.

La mise au point de la version IT pour smartphones s'inscrit dans le cadre des projets soutenus par l'Office fédéral de l'environnement suisse, et le projet européen FOCUS.

BIBLIOGRAPHIE

- BADOUX (E.). — Les tables de production. — *La Forêt*, vol. 23, n° 9, 1994, pp. 30-35.
- BAILEY (R.L.), DELL (T.R.). — Quantifying diameter distributions with the Weibull function. — *Forest Science*, vol. 19, 1973, pp. 97-104.
- BITTERLICH (W.). — The relascope idea; relative measurements in forestry. — Slough (GB): Commonwealth Agricultural Bureaux, 1984. — 242 p.
- BURGER (H.). — Holz, Blattmenge und Zuwachs ; 13. Mitteilung Fichten im gleichaltrigen Hochwald. — *Mitteilungen Schweizerische Anstalt für das forstliche Versuchswesen*, vol. 29, n° 1, 1953, pp. 38-130.
- DAGNÉLIE (P.), PALM (R.), RONDEUX (J.), THILL (A.). — Table de cubage des arbres et des peuplements forestiers. — 2^e édition. — Gembloux : Presses Agronomiques de Gembloux, 1999. — 128 p.
- DAGNÉLIE (P.), PALM (R.), RONDEUX (J.). — Cubage des arbres et des peuplements forestiers ; Tables et équations. — Gembloux : Les Presses Agronomiques de Gembloux, 2013. — 176 p.
- HEBERT (J.), RONDEUX (J.), LAURENT (C.). — Comparaison par simulation de 3 types d'unité d'échantillonnage en futaie feuillue de Hêtre (*Fagus sylvatica* L.). — *Annales des Sciences forestières*, vol. 45, n° 3, 1988, pp. 209-221.
- HILEY (W.E.). — Economics of plantations. — London: Faber and Faber Ltd, 1956. — 216 p.
- KELLER (W.). — Einfacher ertragskundlicher Bonitätsschlüssel für Waldbestände in der Schweiz. — *Mitteilungen Eidgenössische Anstalt für das forstliche Versuchswesen*, vol. 54, n° 1, 1988, pp. 1-98.
- LANGTON (C.G.). — Artificial life; The proceedings of an interdisciplinary Workshop on the synthesis and simulation of living systems, held sept. 1989, Los Alamos, New Mexico: Santa Fe Institute studies in the science of complexity. — *Proceedings* 6, 1989, 655 p.
- PIQUÉ (M.), OBON (B.), CONDÉS (S.). — Comparison of relascope and fixed-radius plots for the estimation of forest stand variables in northeast Spain: an inventory simulation approach. — *European Journal of Forest Research*, vol. 130, 2011, pp. 851-859.
- PRETZSCH (H.), BIBER (P.), SCHÜTZE (G.), UHL (E.), RÖTZER (T.). — Forest stands growth dynamics in Central Europe have accelerated since 1870. — *Nature communications*, vol. 5, 2014, pp. 4967.
- REINEKE (L.H.). — Perfecting a stand density index for even-aged forests. — *Journal of Agriculture*, vol. 46, n° 7, 1933, pp. 627-638.
- SCHÜTZ (J.-P.). — Bestandeseigene Schätzung des Ertragsniveaus an hand bestandesstruktureller Grössen. pp. 118-122. *In*: Tagungsbericht 2016, Jahrestagung 09-11.05 Lyss/Kanton Bern Schweiz, Deutscher Verband Forstliche Forschungsanstalten, Sektion Ertragskunde. U. Kohnle & J. Klädtke (Ed.), Freiburg im Breisgau 2016.
- SCHÜTZ (J.-P.). — Dynamique et conditions d'équilibre de peuplements jardinés sur les stations de la hêtraie à sapin. — *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, vol. 126, n° 9, 1975, pp. 637-671.
- SCHÜTZ (J.-P.). — Ertragsniveau und maximale Bestockungsdichte als Grundlage für die Modellierung der natürlichen Mortalität. pp. 123-132. *In*: Beiträge zur Jahrestagung 2008 / J. Nagel (Ed.). — Göttingen: Deutscher Verband Forstliche Forschungsanstalten, Sektion Ertragskunde, 2008.
- SCHÜTZ (J.-P.). — Est-il possible de maîtriser les coûts des opérations culturales ? Le rôle primordial des rationalisations biologiques. — *Forêt wallonne*, vol. 78, n° sept/oct., 2005, pp. 3-11.
- SCHÜTZ (J.-P.). — Funktionelle Bestandescharakterisierung. Die Fortschreibung der Stammzahlverteilungen ein versprechendes Weg zur Modellierung der Bestandesentwicklung. pp. 54-63. *In*: Beiträge zur Jahrestagung 2006 / J. Nagel (Ed.). — Göttingen : Deutscher Verband Forstliche Forschungsanstalten, Sektion Ertragskunde, 2006.

- SCHÜTZ (J.-P.), ZINGG (A.). — Improving estimations of maximal stand density by combining Reineke's size-density rule and the yield level, using the example of spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.). — *Annals of Forest Science*, vol. 67, n° 5, 2010, pp. 507-518.
- SCHÜTZ (J.-P.), ZINGG (A.). — Zuwachsprognose nach der sozialen Hierarchie im Entwicklungs- und Wuchsmodell SiWaWa. pp. 180-187. *In*: Beiträge zur Jahrestagung 2007 / J. Nagel (Ed.). — Göttingen: Deutscher Verband Forstliche Forschungsanstalten, Sektion Ertragskunde, 2007.
- ZINGG (A.). — Diameter and Basal Area Increment in Permanent Growth and Yield Plots in Switzerland. pp. 239-265. *In*: Growth Trends in European Forests / H. Spiecker, K. Mielikäinen, M. Köhl, J.P. Skovsgaard (eds). — Berlin, Heidelberg: Springer, 1996 (European Forest Institute Research Report No.5).

DES MODÈLES DE PRODUCTION ET D'AIDE À LA DÉCISION SUR SMARTPHONE (Résumé)

La famille des modèles de croissance SiWaWa est conçue pour être utilisable facilement à partir d'entrées les plus simples possibles, en fait au minimum le nombre de tiges (N) et la surface terrière (G), ainsi que l'indice de fertilité (SI, soit h_{dom} à 50 ans). Ces modèles génèrent la distribution des tiges avec une très bonne justesse d'estimation (vers 2-3 % du volume sur pied) pour six essences différentes : Épicéa, Pin sylvestre, Douglas, Hêtre, Frêne et Chêne. Ils s'approprient particulièrement bien à des tâches d'inventaire. Une application sur téléphone mobile, accompagné d'un module de détermination de la surface terrière selon Bitterlich, utilisant les capteurs des portables (notamment l'optique embarquée) les rend facilement applicables au praticien. Ils présentent l'évolution des peuplements observés pendant 30 ans, déterminent la mortalité naturelle et permettent de prévoir n'importe quand des interventions adaptables aux pratiques de l'utilisateur.

MODELS FOR PRODUCTION AND DECISION SUPPORT ON SMARTPHONES (Abstract)

The SiWaWa family of growth models is designed to be easily used with the most simple inputs possible, namely at minimum the number of stems (N) and the basal area (G), and the fertility index (SI, i.e. dominant height at 50 years). These models generate an estimation of stem distribution with very good accuracy (roughly 2-3% of the growing stock) for six different species: Spruce, Scots pine, Douglas fir, Beech, Ash and Oak. They are particularly suitable for inventory-related tasks. A cell phone application, combined with a module for determining the basal area according to Bitterlich, using the device's sensors (in particular, built-in optics) makes them easy to apply in the field. They present development of stands observed for 30 years, determine natural mortality and enable interventions to be planned at the convenience of the user.
