

## MODÉLISATION DE LA STRUCTURE EN DIAMÈTRE DES REBOISEMENTS ET DES PEUPELEMENTS NATURELS DE CÈDRE DE L'ATLAS (*CEDRUS ATLANTICA* MANETTI) DU DJURDJURA (ALGÉRIE)

KHELLAF RABHI – MAHAND MESSAOUDENE – MATHIEU FORTIN – CATHERINE COLLET

L'analyse de la stabilité des peuplements requiert une bonne description de leur structure, c'est-à-dire de la distribution des caractéristiques individuelles des tiges. D'après Rondeux (1993), l'ajustement d'un modèle de répartition des fréquences d'arbres en fonction des classes de grosseur permet de répondre à plusieurs objectifs tels que la construction de tables de production, l'ajustement de modèles de croissance par classe de dimension, l'estimation de la quantité de matériel ligneux par assortiments de produits et la simulation des normes de traitement sylvicole.

Plusieurs distributions théoriques ont déjà été utilisées pour modéliser la structure des peuplements forestiers. Elles ont fait l'objet d'études testant leur degré d'adéquation par rapport à la structure observée. À ce titre, on peut citer l'utilisation, aussi bien en plantations qu'en peuplements naturels, des déciles de Jedlinski, de la loi Log-normale (Dagnelie et Rondeux, 1971) et du système de Pearson pour les distributions unimodales (Sghaier et Palm, 2002 ; Fonton et Sagbo, 2004 ; Sghaier et Ammari, 2012).

La comparaison entre la loi de Weibull, la loi normale (Lejeune, 1994), la loi bêta (Maltamo *et al.*, 1995) et la loi de Johnson (Zhoo et Mc Tague, 1996) a démontré que, parmi toutes les lois précédemment citées, celle de Weibull prédit avec la plus grande fidélité la répartition des tiges.

La distribution de Weibull se caractérise d'une part, par une grande flexibilité et l'existence d'une forme explicite de sa fonction de répartition et d'autre part, par sa capacité à décrire une large gamme de distributions unimodales, y compris la forme de fréquence en J inversé. Elle a été couramment utilisée dans la littérature scientifique forestière (par exemple Bailey et Dell, 1973 ; Gorgoso *et al.*, 2007 ; Lei, 2008). Les études sur l'ajustement de cette loi aux fréquences empiriques ont conduit à l'utilisation de plusieurs méthodes, telles que le maximum de vraisemblance, les moments et les percentiles.

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés à la structure des reboisements et des formations naturelles du Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) de la région du Djurdjura en Algérie. Plus précisément, l'étude a consisté à caractériser la forme de la distribution des arbres par catégorie de dimension et à la modéliser à l'aide de la loi de Weibull. Cette modélisation a été appliquée à deux types de peuplements : les reboisements de Cèdre de l'Atlas du Djurdjura (col de Tirourda, Tizi-Oudjaboub et col de Chellata) réalisés respectivement en 1978, 1987 et 1990 et à la cédraie naturelle du même massif (Tikjda, Djurdjura) où l'approche est appliquée à quatre stades

d'évolution de la futaie se présentant sous forme de bouquets de surface variable (Rabhi, 2015). Nous avons ensuite tenté d'expliquer l'évolution des structures diamétrales au regard de l'histoire des perturbations dans ces peuplements.

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

### Milieu d'étude et matériel expérimental

Le Cèdre de l'Atlas est connu pour sa résistance à la sécheresse et sa capacité à tolérer une vaste gamme de conditions édaphiques. Globalement, la région d'étude se situe dans les bioclimats humide et perhumide culminant à une altitude oscillant entre 1 300 à 1 700 m (Derridj, 1990) (figure 1, ci-dessous). Sa constitution géologique est assez complexe. Le Djurdjura est particulier du fait de sa puissante formation calcaire très épaisse originaire du Lias inférieur et de l'Éocène désignée sous le nom de « calcaire massif » (Abdesslam et al., 2000). Des gneiss et des granits ont été observés en alternance avec des calcaires ou des couches épaisses de grès en plusieurs points. Entre les grands revêtements calcaires, on observe également des couches de schistes. Au col de Tirourda, les grès rouges du Trias supérieur et inférieur et les calcaires (massifs, dolomitisés et à silex) dominent. Par contre, au col de Chellata, les substrats sont les grès fins homogénéiques, les micaschistes sériciteux bleutés et les gneiss œillés. Il en est de même pour Tizi Oudjaboub (Gélard, 1978).

Les sols peu évolués sont considérés des plus fréquents, les sols bruns forestiers caractérisant surtout le versant sud et particulièrement la zone de Tikjda et de Tala Guilef. Bien que la plus grande partie de la zone du Cèdre soit constituée de calcaires du Lias, c'est sur grès et poudingues que les cédraies les mieux conservées sont signalées, en l'occurrence la cédraie des Ait Ouabane, Tigounatine, Draâ Inguel et Tala Guilef (Benmouffok, 1994 : Mestar, 1995 : Krouchi, 2010). Au niveau des pelouses, les sols argileux à hydromorphie temporaire sont présents.

L'inventaire forestier a été réalisé dans les reboisements du col de Tirourda (1978), col de Chellata (1990) et de Tizi-Oudjaboub (1987), parties orientale et occidentale du parc national du Djurdjura et dans la cédraie naturelle de Tikjda (Tigounatine et Amalou Kedrane). La surface totale de ces

FIGURE 1 LOCALISATION DE LA CÉDRAIE DE DJURDJURA



reboisements s'élève à 527 ha, soit 450 pour le col de Tirourda, 40 pour le col de Chellata et 37 pour Tizi-Oudjaboub. Les reboisements ont été introduits dans le milieu de l'yeuseraie (taillis de Chêne vert) très dégradée, ce qui est le cas d'une partie du col de Tirourda (Tiliwa et Lazayev). Les autres espaces de plantation sont des anciennes pelouses de montagne ou zones de parcours, comme au col de Chellata, à Tizi-Oudjaboub et sur tout le versant sud-est du col de Tirourda. Quant à la surface de la cédraie naturelle de Tikjda, elle est de 60 hectares. Les peuplements réguliers occupent des superficies atteignant parfois quatre ares et regroupant les stades de développement suivants : fourré (F), gaulis (G), perchis (P) et futaie adulte (FA). À noter que les peuplements naturels n'ont subi aucune intervention sylvicole, de même que les reboisements qui ont été réalisés dans un objectif de protection.

Afin de caractériser la distribution diamétrale de ces plantations et de ces peuplements naturels, 65 placettes d'échantillonnage ont été établies de façon aléatoire. Ces placettes étaient circulaires, d'une surface de 200 m<sup>2</sup> à l'intérieur de laquelle tous les individus dont le diamètre était supérieur à 7 cm ont été recensés. Pour chacun de ces arbres, la circonférence à 1,30 m (C) et la hauteur totale (H) ont été mesurées.

La description dendrométrique des peuplements inventoriés est récapitulée dans le tableau I (ci-dessous).

TABLEAU I Description des variables dendrométriques des peuplements

		Plantations			Cédraie naturelle			
		Tir	TO	Chell	F	G	P	FA
Paramètres dendrométriques	Nombre de placettes	18	10	8	4	6	8	11
N (tiges/ha)	Minimum	964	760	370	12 260	2 500	1 600	330
	Maximum	2 247	2 210	1 240	31 070	7 900	4 980	1 020
	Moyenne	1 669	1 960	985	22 100	4 800	2 270	640
	Coefficient de variation (%)	18	28	17	20	18	23	30
C (cm)	Minimum	20,41	10,45	8,2	7,41	25,30	40,37	70,12
	Maximum	124,97	98,10	52,3	15,70	62,52	87,20	160,40
	Moyenne	70,93	55,82	24,66	10,99	36,87	72,56	126,52
	Coefficient de variation (%)	23	32	42	31	21	18	16
H(m)	Minimum	4,4	3,5	1,4	0,73	4,10	5,30	15,20
	Maximum	18	15,1	7,2	2,60	8,30	14,60	29,80
	Moyenne	11,51	11,43	4,13	1,76	6,48	11,70	25,95
	Coefficient de variation (%)	12	25	38	25	22	17	13

Tir : col de Tirourda ; TO : Tizi-Oudjaboub ; Chell : col de Chellata ; F : fourré ; G : Gaulis ; P : Perchis ; FA : futaie adulte ; N : densité ; C : circonférence à 1,30 m ; H : hauteur totale.

## Méthode de traitement des données

La distribution diamétrale a été analysée à l'aide du coefficient de dissymétrie de Pearson et du kurtosis<sup>(1)</sup>. Quant à l'établissement de modèles de répartition de tige et comme nous l'avons signalé en introduction, le choix s'est porté sur la distribution de Weibull. Ce modèle de probabilités est intéressant de fait de sa capacité à s'adapter aux données de divers champs, son caractère multi- et interdisciplinaire (Rinne, 2009) et de sa grande souplesse.

La fonction de densité de probabilité de Weibull comprend trois paramètres qui peuvent être estimés par la méthode du maximum de vraisemblance. Toutefois, une fois l'ajustement effectué, on arrive difficilement à mesurer la qualité de l'ajustement. Selon Rondeux (1993), on peut à la place utiliser la fonction de répartition pour estimer la probabilité d'observer un arbre dans une classe de diamètre dont le diamètre inférieur et le diamètre supérieur sont respectivement  $d_1$  et  $d_2$  :

$$p(d_1 \leq Y \leq d_2) = e^{-\left(\frac{d_1-a}{b}\right)^c} - e^{-\left(\frac{d_2-a}{b}\right)^c}$$

Le paramètre  $a$  est un paramètre de localisation, le paramètre  $b$  est un paramètre d'échelle et le paramètre  $c$  est un paramètre de forme. La valeur de l'estimation du paramètre  $c$  est intéressante car elle permet de caractériser la distribution diamétrale. La description détaillée du modèle et de ces paramètres est donnée en annexe (p. 51).

Les tests de Kolmogorov-Smirnov (KS) et de  $\chi^2$  de Pearson ont été utilisés pour apprécier la qualité des estimations et de la conformité (Dagnelie, 1973 ; Lafond, 2010). Nous avons appuyé les comparaisons des divers modèles par l'utilisation d'un indice établi par Reynolds et al. (1988), qui correspond à la sommation des différences absolues entre les effectifs prédits et observés au sein des classes de grosseur définies pour chaque distribution. Cet indice d'erreur (EI) s'intéresse aux différences absolues, ce qui évite les compensations entre classes. La formule d'application est la suivante où  $P_i$  et  $E_i$  sont respectivement les effectifs prédit et observé :

$$EI = \sum_{i=1}^n |P_i - E_i|$$

## RÉSULTATS ET DISCUSSION

### Structure des plantations

Au Djurdjura, des modèles de distribution ont été ajustés pour les reboisements du col de Tirourda (Tir), de Tizi Oudjaboub (TO) et du col de Chellata (Chell), réalisés respectivement en 1978, 1987 et 1990. Les modèles obtenus, leurs paramètres de forme ainsi que les tests de qualité d'ajustement sont présentés dans le tableau II (p. 47). Les structures graphiques sont présentées dans la figure 2 (p. 47).

Il est évident que la classe modale observe une tendance à droite suivant l'âge de chaque plantation (figure 2, p. 47). Néanmoins, pour les reboisements Chell 1990 et TO 1987, l'écart apparaît flagrant du fait de la petite différence d'âge qui caractérise ces deux peuplements.

Du point de vue forme, le modèle Tir 1978 est presque symétrique et accepte aussi un ajustement avec la loi normale de Gauss. Cependant, une légère asymétrie à droite est observée pour les deux autres structures. Le kurtosis élevé constaté pour la plantation Chell 1990 confirme le caractère

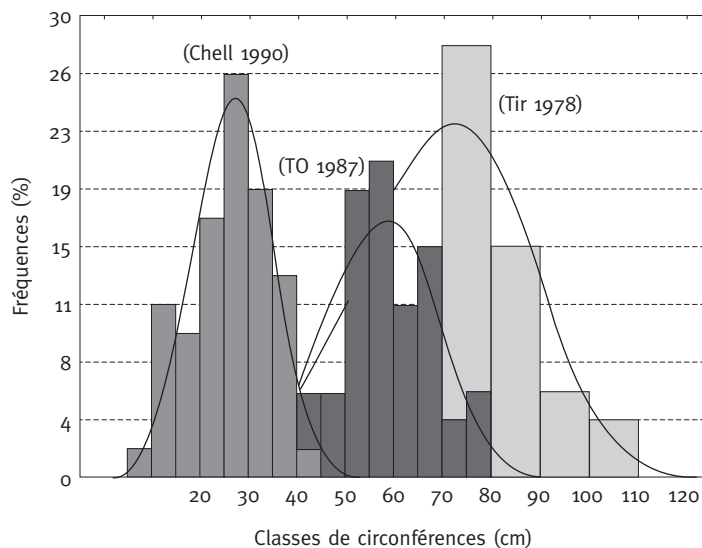
(1) Le kurtosis est aussi appelé coefficient d'aplatissement de Pearson.

TABLEAU II **Forme des structures, paramétrage de la distribution de Weibull et qualité d'ajustement (plantations)**

	Paramètres de forme			Paramètres de Weibull			Qualité de l'ajustement		
	Coefficient de dissymétrie	Kurtosis	Classe modale	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	IE	p khi <sup>2</sup>	d (KS)
Col de Tirourda (Tir)	0,03	0,06	[70-80]	3,25	24,64	4,79	15,62	0,134	0,037
Tizi-Oudjaboub (TO)	- 0,23	0,38	[55-60]	4,02	60,47	5,58	14,68	0,125	0,04
Col de Chellata (Chell)	- 0,59	0,52	[25-30]	3,89	27,69	4,26	18,93	0,147	0,021

*a* : paramètre de localisation ; *b* : paramètre d'échelle ; *c* : paramètre de forme ; IE : indice d'erreur de Reynolds ; p khi<sup>2</sup> : valeur de probabilité du test de khi<sup>2</sup> ; d (KS) : distance maximale du test de Kolmogorov et Smirnov.

FIGURE 2 **PRÉSENTATION DES STRUCTURES GROUPÉES DU DJURDJURA**



pointu de la distribution des peuplements jeunes décrit dans les structures établies pour les forêts soumises à une sylviculture où les effectifs diminuent avec une intensité et une périodicité préalablement fixées. De soi, la tendance que devraient suivre les trois structures du Djurdjura impose un aplatissement progressif avec l'âge résultant de la baisse des effectifs des classes centrales, mais le résultat affiché par la figure 2 montre que, contrairement à la tendance théorique précédemment décrite, la distribution du peuplement le plus âgé (Tir 1978) est plus pointue par rapport à celui plus jeune (TO 1987). La structure traduit donc la réaction du peuplement aux conditions de croissance et aux opérations sylvicoles pratiquées, pour les cas étudiés. En comparaison avec les structures des peuplements qui font l'objet de sylviculture dont plusieurs exemples ont été

rapportés par Lanier (1986), nous pouvons affirmer que l'évolution constatée des trois âges n'obéit pas au schéma théorique montré par les peuplements soumis à des éclaircies.

Quant aux paramètres de localisation (*a*) et de forme (*c*) de Weibull, ils ne montrent aucun changement notable avec l'âge. Par contre, le paramètre d'échelle (*b*) qui coïncide avec la position de la classe modale interprète, avec une précision acceptable, la circonférence moyenne de chaque peuplement. Celle-ci évolue positivement avec l'âge mais le rythme d'augmentation constaté entre Chell 1990 et TO 1987 est considéré très élevé puisque la différence d'âge est insignifiante (seulement de 3 ans). Ceci pourrait être expliqué par des conditions stationnelles difficiles (terrains caillouteux en forte pente) et par le pâturage et brûlage saisonnier de la strate herbacée qui sont fréquents dans la région du col de Chellata.

### Structure des stades de développement

Les résultats relatifs à la forme de chaque distribution et la qualité d'ajustement de chaque modèle sont présentés dans le tableau III (ci-dessous). Les résultats montrent que la tendance à l'augmentation avec l'âge de la position de la classe modale est bien apparente. La différence entre le fourré et le gaulis est considérée comme très importante puisqu'elle passe de [10-15] à [35-40]. À travers les coefficients de dissymétrie et d'aplatissement, les formes des distributions apparaissent, dans tous les cas, faiblement aplaties et dissymétriques à gauche.

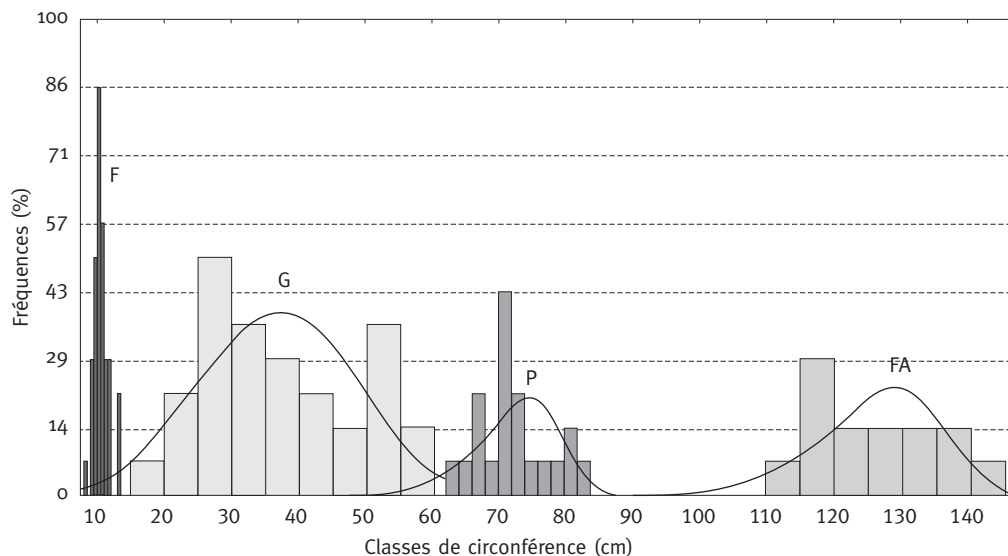
La figure 3 (p. 49) présente les structures établies à l'aide de la distribution de Weibull des quatre stades. À part le glissement à droite des classes modales et une augmentation progressive du paramètre d'échelle, l'évolution des structures avec l'âge ne semble pas obéir au schéma théorique qui prévoit une baisse des effectifs et un aplatissement des structures avec l'âge (Lanier, 1986). Toutefois, il est intéressant de remarquer que la faible réduction des effectifs constatée aux stades gaulis et perchis est la conséquence des mortalités naturelles qui touchent les arbres dominés. Ce phénomène lié à la concurrence pour la lumière ne semble pas affecter le stade futaie adulte. La densité moyenne qui caractérise ce peuplement (640 tiges par hectare) ne serait pas suffisamment élevée pour enclencher le processus de sélection naturelle causant la mortalité des sujets de statut social défavorable à un accès facile à la ressource lumineuse. À propos de l'évolution de la structure avec l'âge, Rondeux (1993) note que, durant la vie d'un peuplement,

TABLEAU III **Forme des structures, paramétrage de la distribution de Weibull et qualité d'ajustement (stades : F, G, P et FA)**

	Paramètres de forme			Paramètres de Weibull			Qualité de l'ajustement		
	Coefficient de dissymétrie	Kurtosis	Classe modale	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	IE	p khi <sup>2</sup>	d (KS)
Fourré (F)	0,15	0,49	[10-15]	3,43	7,15	4,26	12,36	0,148	0,04
Gaulis (G)	0,26	0,23	[35-40]	1,82	22,39	16,96	4,32	0,162	0,02
Perchis (P)	- 0,44	- 0,83	[70-75]	1,84	62,16	11,69	14,03	0,115	0,011
Futaie adulte (FA)	- 0,51	- 0,60	[125-130]	1,44	114,0	13,76	18,95	0,094	0,135

*a* : paramètre de localisation ; *b* : paramètre d'échelle ; *c* : paramètre de forme ; IE : indice d'erreur de Reynolds ; p khi<sup>2</sup> : valeur de probabilité du test de khi<sup>2</sup> ; d (KS) : distance maximale du test de Kolmogorov et Smirnov.

FIGURE 3 ÉVOLUTION DE LA STRUCTURE EN FONCTION DES STADES DE DÉVELOPPEMENT  
(fourré : F ; gaulis : G ; perchis : P et futaie adulte : FA)



l'évolution du nombre de bois par catégories de grosseur donne lieu à un ensemble de courbes dissymétriques, celles-ci étant souvent à gauche pour les jeunes peuplements pour devenir en principe à droite aux âges avancés. Théoriquement et en concordance avec les modèles de structure établis par Sghaier et Ammari (2012) pour les peuplements de Pin d'Alep soumis à une sylviculture extensive en Tunisie, la structure devient de plus en plus aplatie et dissymétrique à droite avec l'âge. Cependant, la présentation des structures groupées en fonction de l'âge (figure 3, ci-dessus) ne semble pas obéir à cette théorie. Si des coupes ont été réalisées durant la période juvénile, on peut s'attendre à observer des courbes présentant une dissymétrie à droite et un aplatissement négatif du fait que l'effectif de la tendance centrale diminue progressivement en plus du déplacement appréciable de la classe modale à droite (gain en grosseur).

## CONCLUSIONS

Dans cette étude, un modèle de distribution diamétrale basé sur la loi de Weibull a été ajusté à des reboisements et des peuplements naturels de Cèdres de l'Atlas au Djurdjura. Les tests utilisés montrent l'efficacité de la distribution de Weibull dans la mesure où tous les modèles obtenus sont acceptables. Les résultats montrent que pour les structures régulières, la distribution de Weibull s'adapte parfaitement. En ce qui concerne l'évolution des structures avec l'âge, les plantations du Djurdjura ont des distributions diamétrales marquées par un glissement à droite témoignant d'une augmentation du paramètre d'échelle. Celui-ci paraît suivre la classe modale de chaque distribution et le diamètre moyen de chaque peuplement. Les deux paramètres descriptifs calculés font apparaître un déséquilibre quant à la dissymétrie et à l'aplatissement des structures. La diminution légère des effectifs est le résultat d'une mortalité naturelle très accrue dans ces peuplements denses et non entretenus. En effet, dans des peuplements soumis à une sylviculture même extensive où la diminution des effectifs avec le temps est contrôlée par le forestier en fixant

l'intensité et la périodicité des coupes, on pourrait s'attendre à ce que les structures s'aplatissent avec l'âge, et la classe centrale, qui s'apparente au diamètre moyen, augmente sensiblement en réaction aux éclaircies pratiquées.

**Khellaf RABHI**  
UNIVERSITÉ BATNA-1  
Département d'agronomie  
5 avenue Chahid Boukhrouf  
05000 BATNA (ALGÉRIE)  
(Khellafrabhi@gmail.com)

**Mahand MESSAOUDENE**  
INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE FORESTIÈRE  
Station régionale de Tizi Ouzou  
BP 30  
Yakouren (15365) TIZI OUZOU (ALGÉRIE)  
(Messa805@yahoo.fr)

**Mathieu FORTIN**  
AgroParisTech  
Laboratoire d'étude des Ressources Forêt-Bois  
(LERFoB UMR 1092)  
14 rue Girardet  
F-54042 NANCY CEDEX  
(mathieu.fortin@agroparistech.fr)

**Catherine COLLET**  
INRA Centre de Nancy-Lorraine  
Laboratoire d'étude des Ressources Forêt-Bois  
(LERFoB, UMR 1092)  
F-54280 CHAMPENOUX  
(catherine.collet@inra.fr)

## BIBLIOGRAPHIE

- ABDESSELAM (M.), MANIA (J.), MUDRY (J.), GÉLARD (J.-P.), CHAUVE (P.), LAMI (H.), AIGOUN (C.). — Arguments hydrogéochimiques en faveur du Trias évaporitique non affleurant dans le massif du Djurdjura (Dorsale kabyle, élément des Maghrébides). — *Revue des Sciences de l'eau*, vol. 13, n° 2, 2000, pp. 155-166.
- ADDAR (A.). — Analyse dynamique de la végétation et biodiversité des massifs orientaux et occidental du Djurdjura. — Alger : USTHB, 2003. — 251 p. (Mémoire Magister).
- BAILEY (R.L.), DELL (T.R.). — Quantifying diameter distributions with the Weibull function. — *Forest Science*, 19, 1973, pp. 97-104.
- BENMOUFFOK (A.). — Approche écopédologique dans les formations à *Cedrus atlantica*. Cas du massif du Djurdjura, Algérie. — *Annales Recherches Forestières Maroc*, n° spécial, 27, vol. 1, 1994, pp. 206-217.
- DAGNELIE (P.). — Théories et méthodes statistiques. Applications agronomiques. — Gembloux (Belgique) : Presses agronomiques de Gembloux, vol. 1, 2<sup>e</sup> édition, 1973. — 377 p.
- DAGNELIE (P.), RONDEUX (J.). — La Répartition des arbres en catégories de grosseur : déciles de Jedlinski et distributions Log-normales. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 28, n° 3, 1971, pp. 289-296.
- DERRIDJ (A.). — Étude des populations de *Cedrus atlantica* Manetti en Algérie. — Université Paul Sabatier de Toulouse, 1990. — 288 p. (Thèse de doctorat).
- DRESS (F.). — Probabilités et statistiques pour les sciences de la vie. — Paris : Ed. Dunod, 2002. — 184 p.
- FONTON (H.N.), SAGBO (A.A.P.). — Modélisation des distributions des paramètres dendrométriques d'une espèce ligneuse dominante en peuplement naturel. — *Annals of Forest Science*, vol. 61, 2004, pp. 545-549.
- GÉLARD (J.-P.). — Carte géologique du nord-est de la Grande Kabylie, schéma structural, échelle 1/2.105. — Travaux du laboratoire associé au CNRS, n° 157, 1978.
- GORGOSO (J.J.), ÁLVAREZ GONZÁLEZ (J.G.), ROJO (A.), GRANDAS-ARIAS (J.A.). — Modelling diameter distributions of *Betula alba* L. stands in northwest Spain with the two-parameter Weibull function. — *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, vol. 16, n° 2, 2007, pp. 113-123.
- KROUCHI (F.). — Étude de la diversité de l'organisation reproductrice et de la structure génétique de Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) en peuplement naturel (Tala-Guilef, Djurdjura nord-ouest, Algérie). — Tizi Ouzou : Université Mouloud Mammeri, 2010. — 127 p. + annexes (Thèse de doctorat en écologie forestière).
- LAFOND (V.). — Évaluation d'un modèle de simulation de dynamique forestière en sapinière – pessière irrégulière de montagne. — Nancy : ENGREF, 2010. — 38 p. (Rapport M2).
- LANIER (L.). — Précis de sylviculture. — Nancy : ENGREF, 1986. — 468 p.



- LEI (Y.). — Evaluation of three methods for estimating the Weibull distribution parameters of Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*). — *Journal of Forest Science*, vol. 54, n° 12, 2008, pp. 566-571.
- LEJEUNE (P.). — Construction d'un modèle de répartition des arbres par classes de grosseur pour les plantations d'Épicéa commun (*Picea abies* L. Karst) en Ardenne belge. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 51, n° 1, 1994, pp. 53-65.
- MALTAMO (M.), PUUMALAINEN (J.), PAIVINEN (R.). — Comparison of beta and Weibull functions for modeling basal area diameter distribution in stands of *Pinus sylvestris* and *Picea abies*. — *Scandinavian Journal of Forest Research*, vol. 10, 1995, pp. 284-295.
- MESTAR (N.). — Cartographie physionomique et approche phytoécologique de la cédraie de Tala Guilef (Djurdjura occidentale). — Alger : INA, 1995. — 116 p. (Thèse de Magister).
- PARDE (J.), BOUCHON (J.). — Dendrométrie. — Nancy : ENGREF, 1988. — 328 p.
- RABHI (K.). — Modélisation et optimisation de la croissance et du fonctionnement du Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) dans le Djurdjura par l'intégration de descripteurs écologiques et dendrométriques. — Université de Tlemcen (Algérie), 2015. — 215 p. (Thèse de doctorat en foresterie).
- REYNOLDS (M.R.), BURK (T.E.), HUANG (W.C.). — Goodness-of-fit tests and model selection procedures for diameter distribution model. — *Forest Science*, 34, 1988, pp. 373-399.
- RINNE (H.). — Weibull distribution, a handbook. — Ed. CRC Press, Justus-Liebig-University (Germany), 2009. — 782 p.
- RONDEUX (J.). — La Mesure des arbres et des peuplements forestiers. — Gembloux (Belgique) : Ed. Presses Agronomiques de Gembloux, 1993. — 521 p.
- SGHAIER (T.), PALM (R.). — Répartition des arbres et des volumes par classes de grosseur dans les peuplements de Pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en Tunisie. — *Annals of Forest Science*, vol. 59, 2002, pp. 293-300.
- SGHAIER (T.), AMMARI (Y.). — Croissance et production du Pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en Tunisie. — *Ecologia mediterranea*, vol. 38, n° 1, 2012, pp. 39-57.
- ZHOO (B.), MCTAGUE (J.P.). — Comparison and evaluation of five methods of estimation of the Johnson system parameters. — *Canadian Journal of Forest Research*, 26, 1996, pp. 928-935.

## ANNEXE

La fonction de densité de probabilité de la loi de Weibull est donnée par la formule ci-après :

$$f(x) = \frac{c}{b} \left( \frac{x-a}{b} \right)^{c-1} \cdot e^{-\left( \frac{x-a}{b} \right)^c}$$

Sa fonction de répartition peut être utilisée pour estimer la probabilité d'observer un arbre de diamètre plus petit que le diamètre cible (Rondeux, 1993). Elle s'écrit comme suit :

$$F(x) = 1 - e^{-\left( \frac{x-a}{b} \right)^c}$$

Une fois la distribution paramétrée, l'effectif estimé d'une classe de diamètre  $[d_1, d_2]$  est calculé par l'intégrale suivante :

$$\int_{d_1}^{d_2} \frac{c}{b} \left( \frac{x-a}{b} \right)^{c-1} \cdot e^{-\left( \frac{x-a}{b} \right)^c} dx = e^{-\left( \frac{d_1-a}{b} \right)^c} - e^{-\left( \frac{d_2-a}{b} \right)^c}$$

Selon les objectifs de chaque étude, cette distribution peut être décrite à l'aide de deux ou trois paramètres. Dans notre cas, le modèle à trois paramètres ( $a$ ,  $b$  et  $c$ ) a été appliqué ; c'est le type de modèle le plus souvent utilisé en foresterie où :

Le paramètre  $a$  est un nombre réel. Il est mesuré dans la même unité que la variable aléatoire. Il est souvent appelé l'origine. Du point de vue statistique, il est appelé paramètre de position.

L'augmentation ou la réduction de sa valeur produit un décalage à droite ou à gauche (tous les autres paramètres étant conservés constants). En foresterie, il est considéré comme la plus petite valeur possible du diamètre dans le peuplement, il sera donc compris entre zéro et le minimum observé. Lei (2008) a montré qu'il prend souvent la valeur de la moitié du diamètre minimal mesuré.

Le paramètre d'échelle  $b$  : c'est un nombre réel positif qui a la même unité de mesure que la variable aléatoire. La variation du paramètre altère la densité de probabilité dans le sens des ordonnées. L'augmentation du paramètre  $b$  induit une compression de la probabilité, et inversement, sa réduction cause un étirement.

Le paramètre de forme  $c$  : c'est un nombre réel positif sans dimension. Il détermine l'aspect de la courbe de densité, celle-ci étant à dissymétrie gauche ou droite selon que  $c$  est supérieur ou inférieur à 3,6. La distribution de Weibull peut prendre de nombreuses formes selon la valeur du paramètre  $c$ . En effet, si  $c$  est inférieur à 1, il s'agit d'une distribution qui suit une courbe en J inversé (structure jardinée). Si  $c$  vaut 1, la distribution suit une courbe exponentielle. Si  $c$  est supérieur à 1, la distribution présente un mode avec un degré de dissymétrie variable :

$1 < c < 3,6$  : courbe en cloche à dissymétrie gauche.

$c = 3,6$  : approximation de la courbe de Gauss (loi normale).

$c > 3,6$  : courbe en cloche à dissymétrie droite.

---

#### **MODÉLISATION DE LA STRUCTURE EN DIAMÈTRE DES REBOISEMENTS ET DES PEUPELEMENTS NATURELS DE CÈDRE DE L'ATLAS (*CEDRUS ATLANTICA* MANETTI) DU DJURDJURA (ALGÉRIE) [Résumé]**

L'objectif de cette étude était d'appréhender la forme de la structure en diamètre de trois peuplements réguliers d'âge différent de Cèdre de l'Atlas ainsi que quatre autres représentant les stades de développement (fourré, gaulis, perchis et futaie adulte) occupant des surfaces variables dans la cédraie naturelle de Tikjda (Djurdjura, Algérie). La démarche de modélisation des structures obtenues consiste à chercher une adéquation avec la distribution théorique de Weibull. Les tests de qualité d'ajustement (*goodness of fit*) montrent la pertinence du choix de cette distribution. Du point de vue forme, les structures sont déséquilibrées du fait de l'absence d'opérations sylvicoles empêchant l'évolution vers une diminution progressive des effectifs et un gain de croissance en diamètre avec l'âge. En effet, la présentation groupée des structures aussi bien des plantations que des stades de développement montre qu'à part un glissement à droite de la classe modale indiquant un grossissement des arbres, la faible diminution des effectifs est due essentiellement aux phénomènes de concurrence et de sélection naturelle puisque aucune intervention sylvicole n'a été pratiquée dans ces peuplements.

#### **MODELLING THE DIAMETER STRUCTURE OF PLANTATIONS AND NATURAL STANDS OF ATLAS CEDAR (*CEDRUS ATLANTICA* MANETTI) IN DJURDJURA (ALGERIA) [Abstract]**

The objective of this study was to understand the diameter structure of three even-aged Atlas cedar stands and four others representing different development stages (thicket, sapling, pole stage and high forest stage), which occupy various surfaces in the Tikjda natural cedar forest (Djurdjura, Algeria). The modelling approach for the structures observed was to seek a fit with the theoretical Weibull distribution. Goodness-of-fit tests showed that this distribution was well chosen. In terms of shape, the structure was unbalanced because no silvicultural action was taken to gradually decrease tree numbers so that remaining stock diameter could increase with age. The comparison between the even-aged stand structures and those of stands at various stages of development showed that apart from a shift to the right of the modal class indicating tree growth, the slight decrease in numbers is mainly due to competition and natural selection since no silvicultural practices have been implemented in this cedar forest.

---