

Gestion intégrée de l'eau à l'échelle du paysage : la science au service du développement, l'exemple de la Tunisie

Jean Albergel, Jean Collinet, Patrick Zante et Hedi Hamrouni

La gestion intégrée de l'eau – et du sol – autour du Bassin méditerranéen est fondée sur différentes stratégies selon le pays concerné. Entre le 'pas une goutte d'eau de plus vers la mer' et l'épuisement des ressources en eau souterraine, ou le début de l'épuisement des aquifères fossiles, différents choix existent. Fondée sur l'exemple du programme national de gestion des bassins versants en Tunisie, cette section illustre comment les résultats scientifiques récents peuvent soutenir ce programme et l'améliorer.

Les stratégies visant à accroître la disponibilité des ressources en eau mais également à limiter les crues et réduire les effets négatifs de l'érosion des sols, ont évolué vers la conception et la mise en œuvre d'un vaste programme de gestion de bassins versants de petite dimension (< 50 km²) ; un échantillon de ceux-ci est consacré à une recherche d'accompagnement pour l'amélioration des connaissances dans la perspective d'une extension de ce programme.

La construction de **petits barrages** semble s'affirmer, comme aménagements ne visant pas seulement à mobiliser des ressources en eau de surface (lacs collinaires), mais également à contrôler les fortes crues tout en protégeant –et limitant l'envasement– des plus grandes structures en aval. Au cours de ces dernières années, la Tunisie et le Maroc ont opté pour cette formule. En Tunisie, dans le cadre d'un projet de construction de 1.000 barrages, plus de 500 ont été construits avec les objectifs suivants : i) gérer les pentes pour réduire les pertes de surface de terre agricole représentant 5.200 ha/an ; ii) réduire l'envasement de 10 barrages principaux en aval, pouvant atteindre 25 million m³/an.; iii) accroître la recharge des nappes souterraines; iv) mobiliser la plus grande partie des 500 million m³ d'eau perdus dans les *sebkhas* (*sebkha* désigne une dépression à forte salinité dans les régions arides) ou dans la mer ; v) créer des points de développement de l'irrigation.

Une retenue collinaire est un lac résultant de la construction d'un petit barrage de terre, dans le lit d'une rivière éphémère ou intermittente. Le barrage peut atteindre 10 mètres de haut (mais sera toujours au-dessous de 15 mètres, seuil fixé par la commission internationale des grands barrages) et est équipé d'un déversoir latéral. Ce déversoir, de construction légère, est utilisé comme « fusible » en cas de pluies très fortes.

Tableau 8. Envasement de petits barrages dans 13 retenues collinaires à l'aval de bassins versants ayant une couverture végétale variée.

Annuaire - ACTA et IRD Tunis – Les chiffres ne montrent ni ne représentent les relations entre couvert forestier et protection contre l'érosion. Les terres agricoles utilisant les techniques de conservation du sol et de l'eau offrent une meilleure protection des sols. Le pourcentage de sols nus dans les bassins versants n'est pas un indicateur fiable du transport solide. Les sols nus peuvent être développés sur des marnes, très sensibles à l'érosion, ou sur un matériau rocheux produisant très peu de sédiments.

Station	Surface du Bassin versant	Année Constr.	volume sédiments 1996	Durée de vie	Volume Exportations	Erosion totale	Érosion spécifique	Végétation %		
								ha	m ³	ans
Sadine 1	384.0	1988	31 275	9	4 746	54 786	17.8	0	68	32
Fidh Ali	412.5	1991	29 640	23	0	47 424	23.0	0	12	88
M'Richet el Anse	158.0	1991	5 000	42	0	8 000	10.1	0	92	8
El Gouazine	1810.0	1990	16 810	83	1 390	28 286	2.6	20	65	15
Hadada	469.0	1992	14 060	24	1 275	23 771	12.7	0	76	24
Janet	521.0	1992	36 010	11	3 482	61 098	29.3	0	62	38
Dekikira	307.0	1991	21 300	51	0	34 080	22.2	33	35	42
Es Senega	363.0	1991	11 850	36	356	19 316	10.6	0	34	66
Arara	708.0	1993	41 220	7	4 126	70 078	33.0	59	41	0
Saadine	272.0	1992	27 370	7	6 570	50 362	46.3	30	70	0
Es Seghir	431.0	1992	2 020	>100	0	3 232	1.9	20	80	0
Kemech	245.5	1993	11 380	38	10 020	28 228	38.3	0	75	25
Brahim Zaher	464.4	1992	14 360	24	174	23 150	12.5	30	27	43

Les lacs collinaires sont très divers et de capacité variable, allant de quelques dizaines de milliers de mètres cubes à plusieurs centaines de milliers de mètres cubes ; leurs bassins versants d'alimentation peuvent varier de quelques hectares à plusieurs dizaines de kilomètres carrés.

Depuis 1995, 26 barrages ont été sélectionnés et équipés pour former un réseau d'observation hydrologique permettant, entre autres, l'évaluation de leur envasement, et donc de leur durée de vie, et de l'érosion d'ensemble du bassin versant (Tableau 8).

Des expérimentations (avec simulateur de pluies) et des travaux de modélisation sur le ruissellement, les réserves en eau et les pertes en sol des versants, ont été réalisés. Ils permettent de préconiser – et de mettre en œuvre - des mesures de gestion et de conservation de l'eau et du sol à l'échelle du bassin versant, fondées sur une base scientifique solide.

Les connaissances fondées sur le calcul de la réserve utile en eau du sol (RU) permettent de: i) simuler des résultats divers pour la pluviométrie annuelle; ii) comparer la capacité de stockage en eau du sol des bassins versants avec celles des barrages de rétention; iii) simuler les besoins en irrigation de différents couverts végétaux. Finalement, elles apportent des outils pour trouver des équilibres entre l'eau verte et l'eau bleue.

Encadré 15. Calcul des réserves utiles (RU) en eau dans le bassin versant de Zanfour

Les cartes de sol au niveau du bassin versant et un système d'informations géographiques (SIG) ont été utilisés pour construire cette information hydro-physique et la spatialiser. Le bassin versant de Zanfour qui mesure 42km² et possède un réservoir de 710.000m³, fait partie du réseau pilote des bassins versants tunisiens. Il s'est avéré donc très intéressant de calculer la réserve utile en eau du sol (RU), pour simuler une variété de résultats en fonction de la pluviométrie annuelle, pour comparer la capacité en eau du sol dans les bassins versants avec celle des barrages et simuler les besoins en irrigation pour tous les types de couvert.

Les profondeurs, textures et charges en éléments grossiers sont tirées de la carte de sol, alors que les seuils critiques d'humidité du sol avec 2,5 à la capacité au champ et 4,2 au point de flétrissement sont calculés par la méthode de A. Bruand, et al. (2002), les deux méthodes permettant ainsi d'ignorer toutes les classes de pédotransfert. Un SIG (logiciel ArcView) a été utilisé pour relier les unités de sol aux variations de profondeur, texture et éléments grossiers, humidité à la capacité au champ et au point de flétrissement, et finalement calculer les isolignes de la réserve utile en eau du sol et en tracer la carte (Figure 45). Parmi toutes les stimulations possibles nous retiendrons :

- **une simulation d'un remplissage partiel de la RU du sol dans le bassin versant**

En 2001, avec des pluies de 350mm, le taux de remplissage des réserves du sol a été obtenu en cumulant annuellement les volumes des différentes classes de sol. Le remplissage partiel des réserves utiles en eau de tous les sols dans le bassin versant a fourni un stockage d'eau de 1.376.495m³ (Tableau 9) représentant deux fois la capacité du barrage.

- **une simulation à saturation de la RU du sol dans le bassin versant**

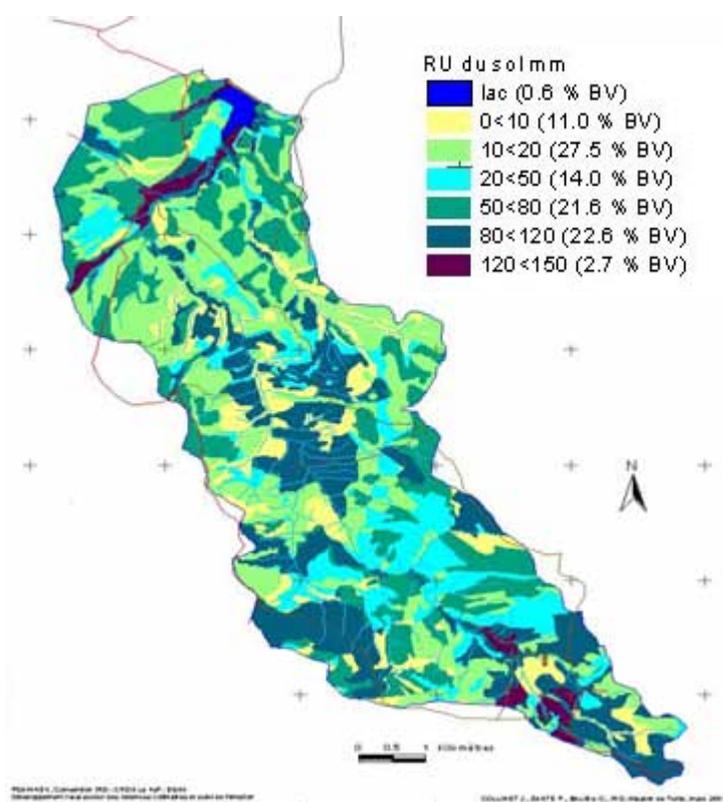
La comparaison des réserves insaturées en 2001 avec les réserves saturées permet d'établir des coefficients de réductions dans la colonne 4 du Tableau 9. Le remplissage complet des réserves en eau de tous les sols du bassin versant fournirait une réserve de 2.176.400 m³ représentant trois fois la capacité du barrage. Avec ce stock et les résultats de 2001 (Pluviométrie annuelle P : 350mm, évapotranspiration d'une culture de référence ETo : 1.896mm), il a été possible de calculer la pluviométrie théorique annuelle permettant de remplir totalement les réserves en eau des sols. Elle devrait atteindre 553mm, à comparer avec la moyenne de la pluviométrie annuelle sur le bassin versant de Zanfour : 400mm)

La capacité de stockage en eau a d'abord été estimée à partir de paramètres climatiques pour des sols ayant des caractéristiques hydro-physiques supposées homogènes et une profondeur constante. Une meilleure évaluation de la réserve utile en eau du sol (RU) a ensuite été obtenue grâce à un coefficient d'utilisation de ces réserves par une plante dont le système racinaire permettrait une utilisation progressive des 100cm de sol meuble. L'utilisation de la mesure de la profondeur (épaisseur) du sol accessible aux racines constitue déjà un progrès. Néanmoins, cela ne nous donne aucune information ni sur les caractéristiques physiques des matériaux qui peuvent contrôler l'accessibilité pour les racines, ni sur le volume des réserves en eau nécessaires, ni sur les possibilités de la remontée capillaire d'un aquifère plus profond. Un exemple des méthodes utilisées pour surmonter ces difficultés est présenté dans l'encadré 15, le tableau 9 et la figure 45.

Les résultats illustrent l'utilité de méthodes fournissant des données quantitatives et spatiales précieuses pour la gestion de l'eau dans les bassins versants, et tout particulièrement pour les cultures pluviales et irriguées, en relation avec les pluies et l'eau stockée dans le barrage, permettant ainsi d'agir sur l'équilibre entre l'eau bleue et verte.

Tableau 9. Réserves en eau du bassin versant pour une saturation partielle et totale du sol

RU moyenne par classe (mm)	Superficie de chaque classe (ha)	Saturation totale RU x surface (m ³)	Coef. réduction Stock / P cum	Remplissage 2001 RU x surface x coefficient (m ³)
5	481	24	0.29	7
15	1,202	180	0.51	92
35	609	213	0.63	134
65	943	613	0.65	398
100	988	988	0.65	642
135	117	158	0.65	103
total	4,340	2,176		1,376



Les effets du changement de la couverture végétale, y compris le couvert forestier, et des techniques de conservation de l'eau et du sol, peuvent être prédits grâce au calcul de l'érosion en nappe et en ravine et à l'utilisation de méthodes de simulation.

Les paragraphes suivants offrent trois exemples de la manière dont les progrès scientifiques peuvent servir à la gestion du bassin versant vis-à-vis de l'érosion des sols. Ces résultats ont été obtenus par un travail de recherche sur le bassin versant d'Abdessadok

Encadré 16. Calcul de l'érosion depuis la création du barrage, pour la période 1993 à 2001

Le modèle a donné les érosions globales suivantes :

- a) 1,75t / ha / an pour une année sèche calculée avec un index de pluviométrie $R_{si} = 25 \text{ MJ.mm / ha.h}$
- b) 4,12 t / ha / an pour une année médiane où $R_{si} = 64 \text{ MJ.mm / ha.h}$,
- c) 6,03 t / ha / an pour des années humides où $R_{si} = 93 \text{ MJ.mm / ha.h}$.

Il semble que les occurrences exceptionnelles de forts orages (au-dessus de 50 mm par jour avec des intensités élevées, supérieures à 90 mm/h pendant 5 minutes) affectent fortement ces estimations calculées sur de longues durées. Ainsi, 1994-1995 a été une année particulièrement agressive avec un index de pluie calculé à partir de 276 épisodes pluvieux (intensité calculée sur 30 minutes) dont 219 épisodes pluvieux en octobre 1994, période de forte vulnérabilité du sol à cause des labours ; le calcul de l'érosion globale, pondéré par la superficie et un index de sol nu ($C = 1$) pendant la saison des labours, donne 22,5 t / ha / an, ce qui est suffisant pour expliquer l'envasement précédent.

Encadré 17. Simulation de reboisement en pin d'Alep en remplacement de formations arbustives d'amont situées sur lithosols calcaires.

La première simulation a concerné le reboisement de la zone actuelle de formations arbustives sur des piémonts à forte pente (>25%), avec des lithosols (sol unité 3) et des régosols (sol unité 7). Sans attendre que les arbres atteignent l'âge de 20 ans pour observer une amélioration générale de la protection du bassin, la simulation a permis de détecter un accroissement de la protection d'environ 12% (Figure 46). D'autres facteurs doivent également être pris en compte, tels que l'amélioration des réserves en eau (tel que cela a été observé pour le bassin versant de Zanfour), la disponibilité en bois de construction et bois de feu, biens essentiels pour la communauté agricole du bassin, qui viennent s'ajouter aux bénéfices liés à la réduction de l'érosion.

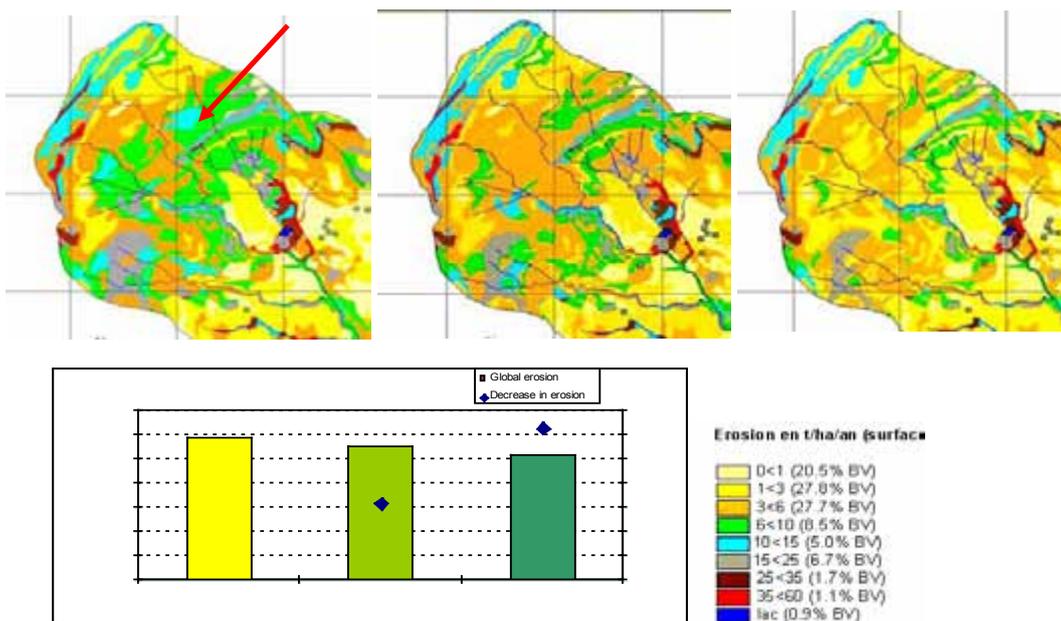


Figure 46. Le Bassin versant d'Abdessadok (en partie) : contrôle de l'érosion par le remplacement en amont de formations arbustives sur lithosols (à gauche) par une jeune forêt (au centre) ; à droite la même forêt adulte.

Encadré 18. Simulation de l'enlèvement de banquettes pour la rétention de l'eau et du sol

Cette simulation a analysé les effets de l'enlèvement total des banquettes de rétention sur les deux rives d'une rivière s'écoulant entre des glacis cultivés. Cet enlèvement augmenterait de 30% l'érosion globale du bassin versant (Figure 47). En enlevant les banquettes seulement sur la rive droite ou seulement sur la rive gauche, on a constaté que leurs effets de protection variaient de façon significative selon les rives : la rive droite s'est montrée plus fragile du fait de sols nus sur une plus grande surface et de pentes plus fortes.

dont les caractéristiques sont les suivantes : surface : 307 ha, capacité initiale du barrage : 92.500 m³. En 2001 sa capacité était de 65.000 m³ en raison d'un envasement spécifique de 10,6 m³/ha/an, 50% du bassin étant utilisé pour les activités agricoles (culture de céréales à faible rendement + élevage extensif de moutons sur les zones pentues).

- a) L'érosion des pentes selon les modes d'utilisation du bassin a été analysée et quantifiée, soit à partir de parcelles expérimentales, soit à l'échelle du bassin. L'analyse de comportement (parcelle) à grande échelle a permis de comprendre le phénomène à petite échelle (bassin), et en particulier de distinguer la transition de l'érosion aréolaire et linéaire à l'érosion en ravine. Les modèles statistiques tels que celui de la RUSLE₂ (équation universelle de perte en sol révisée) de G.R. Foster permet des applications sur des pentes à géométrie complexe. Ils ont été mis en oeuvre et combinés à l'aide d'un SIG pour différents bassins de Tunisie (voir Encadré 16). Les résultats ont été comparés à l'envasement de la retenue collinaire ; ils ont montré que les méthodes utilisées pour simuler l'érosion du sol sont cohérentes avec les observations réelles, et peuvent apporter des données précieuses permettant l'amélioration des techniques agricoles et d'usage des terres.

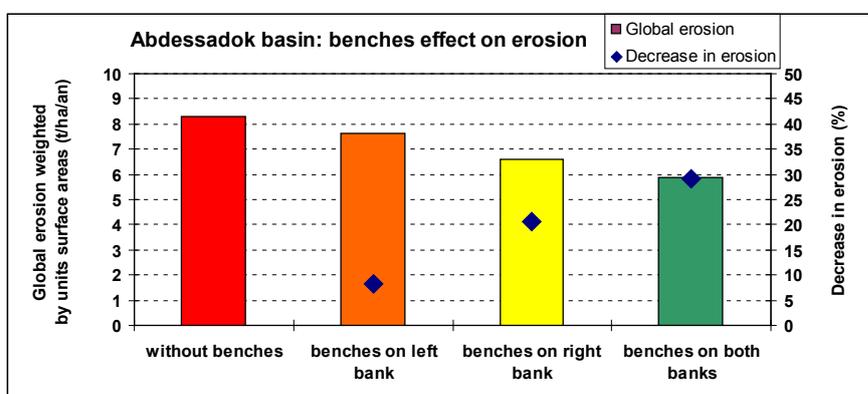


Figure 47. Le bassin versant d'Abdesadok : modification des érosions calculées à l'aval du bassin versant à la suite de l'enlèvement partiel ou total des banquettes.

- b) Le couvert végétal influe sans aucun doute sur les processus hydriques et d'érosion (voir chapitres 1 et 2). Il est donc important lorsque l'on établit des plans de gestion de bassins versants, de prévoir les conséquences que certains types de couvertures du sol dans certaines parties du bassin versant pourront avoir sur l'érosion. Comme l'expérimentation serait très longue (en particulier dans le cas de la plantation d'une nouvelle forêt !), des techniques pertinentes de modélisation peuvent offrir d'excellentes alternatives. Ces méthodes ont été appliquées avec succès pour le bassin versant d'Abdessadok (voir Encadré 17). Les résultats montrent que la substitution sur certaines unités de la végétation arbustive par des peuplements de pin d'Alep réduirait effectivement les pertes en sol et l'ensablement du barrage, et pourrait, de surcroît, fournir d'autres biens.
- a) En plus des barrages, la gestion des bassins versants comprend souvent aussi la construction de **banquettes pour la rétention de l'eau et du sol** sur les deux rives d'un cours d'eau s'écoulant à travers des glacis cultivés. Des techniques de modélisation permettent de simuler l'absence ou l'enlèvement de ces équipements. Quelques données concernant les simulations réalisées dans le bassin versant d'Abdessadok sont présentées dans l'Encadré 18 ; elles montrent que les banquettes jouent un rôle significatif dans la réduction de l'érosion mais que l'efficacité de leur protection diffère en fonction du sol et de son couvert végétal.

Il convient de garder un esprit critique vis-à-vis d'un modèle plus empirique (statistique) que mécaniste (physique). Le modèle utilisé présente, en effet, plusieurs termes multiplicatifs qui ne rendent pas compte de la non linéarité entre les différents facteurs, mais le fait est que les calculs de l'érosion obtenus dans quatre études antérieures de bassins d'une surface équivalente, ont donné des résultats cohérents avec ceux mesurés par bathymétrie dans les lacs collinaires. Cette cohérence de résultats est probablement due à ce que les sédiments produits sur les différents segments des pentes sont transportés dans leur totalité vers l'émissaire, sans sédimentation intermédiaire en raison de pentes courtes et généralement très fortes, et que les écoulements conservent durablement leur capacité de transport des sédiments du fait de leur vitesse et de la finesse des éléments transportés. Dans la limite des caractéristiques présentées ci-dessus, l'estimation de l'érosion globale calculée par pondération est également une hypothèse raisonnable. Enfin, les simulations fournissent une évaluation adéquate des effets de tout changement de couvert végétal envisagé, y compris le reboisement qui peut être réalisé, si c'est pertinent, sur des zones où les réserves en eau sont propices à l'établissement des jeunes plants. Un cas spécifique, non couvert par les études décrites ici, est celui de bassins partiellement ou totalement situés sur marnes, qui sont particulièrement sujets au ravinement. Dans de telles conditions, l'érosion peut être de 10 à 100 fois plus grande que les érosions en nappe, calculées dans les modèles précédents.

Pour en savoir plus

- Albergel, J. and Rejeb, N., 1997. Les lacs collinaires en Tunisie: Enjeux, contraintes et perspectives. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*. Pp.77–88.
- Bruand, A., Perez Fernandez, P., Duval, O., Quetin, P., Nicoulaud, B., Gaillard, H. and Raison, L. 2002. Estimation des propriétés de rétention en eau des sols, utilisation de classes de pédotransfert après stratifications texturale et texturo-structurale. *EGS / AFES* 9(2) 105–125.
- Collinet J., Zante P. and Ghesmi M. 2001. Cartographie des risques érosifs sur le bassin versant du barrage collinaire de Zanfour (nord dorsale tunisienne). Pour la convention CRDA Le Kef / ESAK / IRD dans le cadre du Programme: Développement durable autour des retenues collinaires et suivi de l'érosion., Mission I R D de Tunis. 60 p.
- Hentati, A., Kawamura, A., Amaguchi, H. and Iseri Y. 2010. Evaluation of sedimentation vulnerability at small hillside reservoirs in the semi-arid region of Tunisia using the Self-Organizing Map. *Geomorphology* 122: 56–64.
- Foster, G.R., Yoder, D.C., McCool, D.K., Weesies, G.A., Toy T.J. and Wagner L.E. 2001. The Design Philosophy Behind RUSLE2: Evolution of an Empirical Model. Pp. 95–98. In: *Soil Erosion Research for the 21st Century, Proc. Int. Symp.* (3-5 January 2001, Honolulu, HI, USA). Eds. J.C. Ascough II and D.C. Flanagan. St. Joseph, MI: ASAE. 701P0007.



What Science
Can Tell Us

L'Eau pour les Forêts et les Hommes en Région Méditerranéenne :

un équilibre à trouver

Yves Birot, Carlos Gracia et Marc Palahí (éditeurs)



What Science Can Tell Us

Marc Palahí, Editor-In-Chief
Minna Korhonen, Managing Editor
The editorial office can be contacted at publications@efi.int

Traduction: Catherine Amette
Layout: Kopijyvä Oy / Janne Kuivalainen
Printing: Kopijyvä Oy

Disclaimer: This volume has been developed with the support of the SylvaMED Project “Mediterranean forests for all”, with the financial contribution of the European Union through its European Regional Development Fund and the Programme MED. The views expressed are those of the authors and do not necessarily represent those of the European Forest Institute or the European Union.

ISBN: 978-952-5453-81-2 (printed)
ISBN: 978-952-5453-82-9 (pdf)



EUROPEAN FOREST INSTITUTE