

Protection hydrologique pratique pour les forêts tropicales: l'expérience de la Malaisie

N.A. Chappell et H.C. Thang

Les synergies entre la recherche hydrologique et la certification de la gestion des forêts naturelles dans les zones tropicales humides donnent lieu à des normes pour la protection des eaux qui sont aussi partiellement applicables aux plantations forestières et aux systèmes agroforestiers.

Structure de jaugeage d'un cours d'eau dans la zone tampon du bassin versant expérimental de Baru où se pratique la coupe d'écramage, Malaisie orientale



N.A. CHAPPELL

Les ressources en eau sont indispensables pour les populations, l'écologie et le développement économique dans les zones boisées comme dans celles non boisées. Étant donné que les forêts naturelles tropicales échappent à la contamination par les produits chimiques artificiels, comme ceux présents dans les paysages urbains ou issus de l'agriculture intensive, leur eau est souvent beaucoup moins dangereuse pour la santé humaine. Paradoxalement, en raison de la qualité inhérente de l'environnement des forêts naturelles, les normes de protection environnementale relatives aux forêts où se pratique la coupe d'écramage, y compris leurs besoins hydrologiques, sont bien plus rigoureuses que les normes relatives aux terres non boisées.

Les directives pour la protection hydrologique pendant les opérations forestières abondent dans la littérature forestière et hydrologique mondiale (Megahan, 1977;

Cassells, Gilmour et Bonell, 1984; FAO, 1996, 1999; Sabah Forestry Department, 1998; Hamilton, 2004; Thang et Chappell, 2004, par exemple). Elles comprennent des mesures visant à protéger l'état des sols, de l'eau et des éléments nutritifs, la réalimentation des principaux aquifères, le microclimat et l'évaporation, et les ressources fluviales. Toutefois, dans certaines des directives publiées, manque une base scientifique crédible, d'autres sont contradictoires, quelques-unes ne sont pas économiquement viables, d'autres encore ne sont applicables directement que dans des environnements tempérés, certaines sont tellement complexes qu'il faudrait avoir un doctorat en hydrologie pour pouvoir les appliquer et, enfin, certaines ont même des impacts négatifs sur quelques aspects du système hydrologique.

Le présent article analyse la base hydrologique des normes comprises dans le système malaisien de critères et indicateurs de

Nick A. Chappell est hydrologue forestier à l'Université de Lancaster, Lancaster, Royaume-Uni, et conduit des recherches en collaboration avec des hydrologues et forestiers malaisiens. **Thang Hooi Chiew** était Directeur général adjoint, Forestry Department Peninsular Malaysia (Département des forêts de la Malaisie péninsulaire), et travaille activement à l'élaboration de critères et indicateurs de gestion forestière durable et certification.

la certification de la gestion forestière, qui a été utilisée pour certifier les pratiques forestières dans 4,7 millions d'hectares de forêts classées permanentes dans quatre États de la Malaisie péninsulaire: Selangor, Pahang, Terengganu et Negeri Sembilan. L'incorporation de normes hydrologiques dans le système de certification assure leur application universelle dans toutes les unités de gestion forestière certifiées. L'article identifie ce que les auteurs considèrent comme la norme hydrologique la plus importante – la zone tampon du cours d'eau – et examine son application hors des forêts naturelles tropicales, mesure qui est importante car de nombreuses forêts naturelles certifiées sont converties, à l'heure actuelle, à l'agriculture, à l'agroforesterie et à l'urbanisation en l'absence de normes hydrologiques certifiées. Les enseignements tirés du secteur forestier relativement bien développé de Malaisie, en particulier ceux étayés par une recherche hydrologique approfondie, pourraient être appliqués aussi à d'autres pays tropicaux.

NORMES DE PROTECTION HYDROLOGIQUE

Les critères et indicateurs de certification de la gestion forestière malaisiens (Thang, 1996; MTCC, 2001, 2004) contiennent des normes de performance ou vérificateurs utilisées pour favoriser le système hydrologique grâce à la protection du couvert et du terrain forestiers (sols et eau). Certaines de ces normes visent directement la protection hydrologique, alors que d'autres, notamment celles destinées à réduire les dommages collatéraux causés au couvert, ont un impact indirect sur les phénomènes hydrologiques. La perturbation du couvert due à l'ouverture de chemins forestiers et ensuite à la récolte d'écrouillage, par exemple, peut être minimisée par l'exploitation à impact limité (Pinard, Putz et Tay, 2000) qui vise à réduire les dégâts infligés au peuplement résiduel, aux jeunes tiges en particulier, et à la biodiversité (Thang, 1987). Cette technique a l'avantage hydrologique indirect de diminuer les changements du microclimat forestier et de combattre la baisse de l'évapotranspiration (Nik et Harding, 1992; Chappell *et al.*, 2004b), tout en réduisant la perte de biomasse et son effet sur les fuites d'éléments nutritifs et de carbone (Yusop, 1989).

Du point de vue quantitatif, la sédi-

mentation et la turbidité des cours d'eau sont les principaux aspects hydrologiques imputables à l'exploitation commerciale des forêts naturelles tropicales, comme l'a signalé une étude récente (Chappell *et al.*, 2004b). Des recherches menées récemment, en Malaisie en particulier, ont montré que l'érosion, l'effondrement des ponceaux de troncs creux (le long des voies d'accès et des pistes de débardage secondaires), ainsi que les glissements de terrain, peuvent augmenter la sédimentation des cours d'eau de 5 à 50 fois directement après la récolte d'écrouillage (Chappell *et al.*, 2004a,b). L'accumulation de sédiments compromet l'habitat de la faune aquatique, augmente les risques de crues en aval, accroît les coûts du traitement de l'eau potable et conduit à l'inondation des lits de corail en mer.

Les normes forestières susceptibles de réduire ces changements et de promouvoir la remise en état rapide sont donc les plus importantes pour la protection hydrologique. Dans les forêts de production des forêts classées permanentes de Malaisie, l'érosion, l'effondrement des ponceaux de bois et les glissements de terrain sont liés en premier lieu aux perturbations du terrain, qui se produisent le long des pistes de débusquage (chemins utilisés par les débusqueuses à chenilles dans les parcs à grumes) et les pistes de débardage (chemins aménagés pour les grumiers), par les abattages à la lame, le compactage, le nivellement et les franchissements des cours d'eau. L'ouverture du couvert n'est qu'un facteur secondaire (Chappell *et al.*, 2004a). Bien que les critères et indicateurs malaisiens préconisent la réduction au minimum des pistes de débusquage et de débardage, la relation entre la densité des réseaux de chemins ou de pistes et les apports de sédiments est complexe, du fait que les réseaux sont, dans une large mesure, séparés des cours d'eau permanents (rivières et fleuves) (Sidle *et al.*, 2004). Cependant, lorsque les sédiments atteignent les cours d'eau permanents, ils sont facilement transportés en aval sur de grandes distances.

Les parties les plus sensibles du paysage, du point de vue hydrologique, sont les voies d'eau permanentes et leurs points d'intersection avec les chemins ou les pistes (Chappell *et al.*, 2007). Conformément aux critères et indicateurs pour la Malaisie péninsulaire, il faudra délimiter, le long de

tous les cours d'eau permanents, une zone tampon de 10 m de large (5 m de chaque côté du cours d'eau) où l'accès des véhicules et la coupe des arbres sont limités aux franchissements des cours d'eau dotés de ponts et de ponceaux.

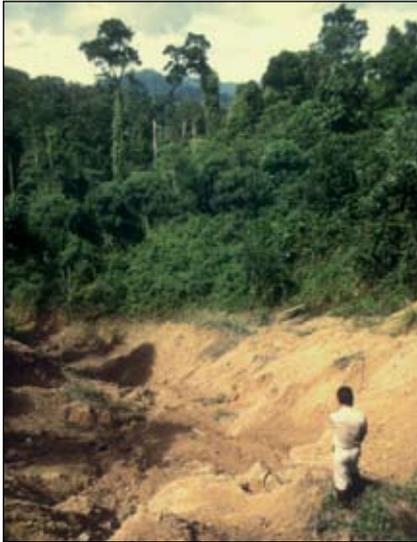
Tous les systèmes de critères et indicateurs ne s'accordent pas quant à l'emplacement et aux dimensions recommandés de ces zones tampons. D'après certains forestiers, les cours d'eau éphémères où, par définition, l'eau ne coule que pendant les orages, devraient être protégés (FAO, 1999; Cassells et Bruijnzeel, 2004), alors que d'autres estiment que la protection n'est pas nécessaire pour ceux de moins de 5 m de large (Sist, Dykstra et Fimbel, 1998). Dans les zones tropicales humides, où la densité de drainage (la longueur du cours d'eau permanent par unité de surface du bassin versant) est très élevée, si l'on établissait des zones tampons pour les cours d'eau éphémères, elles pourraient absorber 40 pour cent du paysage (Thang et Chappell, 2004). En outre, Chappell *et al.* (2004a) ont démontré que la sédimentation est la plus élevée dans les cours d'eau se situant le long de ceux du premier au troisième ordre (c'est-à-dire des voies d'eau permanentes aux petites rivières). Cela montre qu'il n'est pas indispensable de protéger les cours d'eau éphémères mais qu'il est important de doter de zones tampons toutes les rivières et les ruisseaux permanents. Cette recherche confirme donc la norme hydrologique appliquée universellement dans les forêts classées des États malaisiens de Selangor, Pahang, Terengganu et Negeri Sembilan.

Dans un bassin versant expérimental de la forêt classée d'Ulu Segama en Malaisie orientale, il a été observé que les glissements provoqués par la construction de routes se déplaçaient de 150 à 500 m (Chappell *et al.*, 2004a). Bien que les pistes de débardage dans cette zone étaient

Distance moyenne des pistes de débardage par rapport aux cours d'eau permanents, bassin versant expérimental de Baru, Forêt classée d'Ulu Segama, Malaisie orientale

Type de cours d'eau	Distance (m)
Cours d'eau de premier ordre	87
Cours d'eau de second ordre	158
Cours d'eau de troisième ordre	255

Source: Chappell *et al.*, 2004a.



Glissement de terrain de 500 m au-dessous d'une piste de débardage secondaire peu de temps après la défaillance (bassin versant expérimental de Baru)

tracées et construites correctement, elles étaient plus près que cela des cours d'eau permanents (voir le tableau), ce qui indique que les sédiments créés par des matériaux de déblais et remblais mal gérés peuvent atteindre les cours d'eau permanents. Ainsi, bien que la zone tampon puisse protéger l'eau en interdisant aux débusqueuses d'utiliser les cours d'eau comme route de transport, son rôle n'est pas de piéger les sédiments venant de l'amont. Ziegler *et al.* (2006), travaillant dans des paysages agricoles au nord du Viet Nam, ont également mis en doute l'efficacité des zones tampons, même celles de 50 m de large, dans le piégeage des sédiments. Bren (2000) et Chappell *et al.* (2006) ont laissé entendre que la prédiction de l'efficacité de piégeage des zones tampons ou de l'emplacement des sols sensibles aux perturbations le long des berges des cours d'eau est actuellement trop incertaine pour consentir l'application pratique de zones tampons de largeur variable dans les forêts.

Bien qu'il soit défendu aux débusqueuses d'utiliser les cours d'eau comme routes dans les zones d'exploitation à impact limité (Sabah Forestry Department, 1998, par exemple), les points d'intersection des pistes de débusquage avec les cours d'eau permanents peuvent déterminer dans les ruisseaux des apports de sédiments qui passent ensuite dans les rivières. Les critères et indicateurs pour la Malaisie péninsulaire

préconisent divers systèmes de franchissement des cours d'eau à l'aide soit des ponceaux soit des ponts. Une recherche hydrologique s'impose pour faire en sorte que les franchissements autorisés, y compris l'emploi de troncs creux qui pourraient s'effondrer au bout de quelques années, soient à la fois hydrologiquement viables et économiques dans le long terme. Le débardage par hélicoptères et le téléphérage par câble aérien, mis à l'essai sur des pentes escarpées en Malaisie orientale (Mannan et Awang, 1997), peuvent réduire sensiblement le nombre de chemins forestiers par l'élimination de l'emploi de débusqueuses dans ces zones (FAO, 1996). Bien que la diminution des franchissements des cours d'eau devrait limiter la sédimentation de ces derniers, il est encore trop tôt pour mesurer directement l'impact de ces différentes méthodes de débardage dans les tropiques à l'échelle du bassin versant. Les principaux chemins de débardage dotés de ponceaux en béton, de ponts aménagés et de revêtement de gravier, sont conçus de telle manière que leur effet sur les sédiments devrait disparaître assez rapidement après la construction (Forestry Department Peninsular Malaysia, 1999).

La certification dans les forêts classées des États de Selangor, Pahang, Terengganu et Negeri Sembilan a encouragé l'application de pratiques améliorées d'exploitation étayées par une recherche hydrologique fondamentale (Thang et Chappell, 2004). Les gestionnaires fonciers devraient demander si l'application de ces conclusions pourrait servir aussi à la protection hydrologique lors du défrichement de la forêt, de l'établissement de plantations d'essences tropicales ou de la mise en œuvre de systèmes agroforestiers.

PROTECTION DANS LES FORÊTS NATURELLES ET LES PLANTATIONS NON CERTIFIÉES

Comme décrit plus haut, pour la protection contre les principaux changements hydrologiques survenant dans les forêts naturelles tropicales, l'établissement d'une zone tampon de 10 m de large le long de tous les ruisseaux et rivières permanents pendant les opérations d'exploitation s'avère efficace. Dans les forêts où il ne serait pas économiquement viable de respecter toutes les normes environnementales matérielles nécessaires pour obtenir la certification des évaluateurs internationaux, cette seule

norme, si elle est suivie rigoureusement, a de bonnes possibilités de garantir la protection des ressources hydriques dans les forêts naturelles.

Dans de nombreuses zones où l'on prévoit la conversion des forêts naturelles aux plantations, systèmes agroforestiers ou autres utilisations des terres, on pourrait mettre en doute l'utilité de limiter les coupes d'arbres le long de toutes les berges de cours d'eau permanents. Cependant, la recherche a montré que l'établissement d'une zone tampon conforme aux critères et indicateurs de certification de la gestion forestière en Malaisie péninsulaire limiterait l'exploitation forestière (à l'exception des franchissements «bien aménagés») à 7 pour cent seulement du paysage aux fins de la protection des voies d'eau (Thang et Chappell, 2004) – à savoir moins que la superficie de forêts classées normalement destinée à la protection de ressources biologiques et physiques. En outre, une telle zone tampon pourrait protéger la plupart des petites rivières les plus sensibles au plan hydrologique (c'est-à-dire, moins de 5 m de largeur du lit) qui sont les plus nombreuses dans le paysage mais les moins protégées dans la plupart des forêts tropicales (Thang et Chappell, 2004; Chappell *et al.*, 2007). Si ces bandes de forêt naturelle ne peuvent être maintenues, on obtiendrait encore des avantages hydrologiques considérables en limitant autant que faire se peut l'emploi de débusqueuses dans la zone tampon de 10 m le long des cours d'eau permanents. La conservation de ces bandes protégerait aussi les habitats de la faune aquatique en réduisant la perturbation des régimes de température de l'eau associée au défrichement de la forêt (Davies et Nelson, 1994). De fait, les critères et indicateurs provisoires pour les plantations forestières malaisiennes (MTCC, 2007) préconisent la délimitation de la zone tampon de 10 m le long de tous les cours d'eau pendant et après l'établissement des plantations.

Dans les systèmes agroforestiers ou agricoles intensifs et dans certaines plantations forestières, l'emploi de pesticides et d'engrais artificiels augmente considérablement la nécessité de définir et protéger les cours d'eau. Dans les berges saturées, où les produits chimiques peuvent atteindre l'eau rapidement du fait qu'ils sont généralement transportés plus aisément par ruissellement qu'à travers les flux souterrains, interdire leur emploi est la meilleure façon d'éviter

qu'ils deviennent dangereux pour la santé humaine: dans ce cas, les zones tampons le long des berges où l'application directe de produits chimiques est exclue devront probablement dépasser 5 m de large pour être efficaces (McKergow *et al.*, 2004). La présence de la forêt naturelle le long de ces berges réduit aussi le risque de ruissellement car elle intensifie l'évaporation et l'infiltration et augmente l'absorption des éléments nutritifs s'écoulant le long des pentes, réduisant par là même la pénétration de produits chimiques dans le lit des cours d'eau (McDowell, 2001).

CONCLUSIONS

Les deux décennies de recherches sur les pratiques forestières et les processus hydrologiques dans les forêts naturelles de Malaisie, qui sous-tendent la certification des pratiques forestières hydrologiquement rationnelles dans les forêts classées des États de Selangor, Pahang, Terengganu et Negeri Sembilan, fournissent des conclusions pouvant servir à la gestion forestière durable d'autres pays des zones tropicales humides. Les techniques d'exploitation à impact limité appliquées dans plusieurs États malaisiens contribuent au maintien du fonctionnement hydrologique des rivières dans les forêts naturelles (Nik et Harding, 1992; Yusop, 1989; Chappell *et al.*, 2004b; Thang et Chappell, 2004, par exemple). Ces rivières revêtent une importance considérable pour l'approvisionnement en eau potable car elles ne sont pas contaminées par les produits chimiques artificiels. Toutefois, c'est en agissant sur la sédimentation que les pratiques forestières influencent le plus les cours d'eau présents dans les forêts naturelles gérées pour une production à long terme de bois (Chappell *et al.*, 2004b).

Les normes hydrologiques de performance des critères et indicateurs de certification de la gestion forestière pour la Malaisie péninsulaire proposent des mesures visant à atténuer les impacts sur la sédimentation (Thang et Chappell, 2004).

Malgré l'intensification récente de la recherche hydrologique dans les forêts naturelles tropicales (Bonell et Bruijnzeel, 2004), l'impact de nombreuses pratiques forestières sur les systèmes hydrologiques tropicaux est encore faiblement quantifié. Les quantités et les sources des sédiments, en particulier, sont extrêmement difficiles à calculer avec précision à cause du caractère épisodique de leur apport, de l'hétérogénéité de leurs origines et des moyens technologiques perfectionnés exigés pour ce type de mesure (Douglas *et al.*, 1999; Chappell *et al.*, 2004a). Malgré ces incertitudes, il est clair que les petits cours d'eau permanents – du fait qu'ils incorporent la partie majeure de la longueur des rivières permanentes (Chappell *et al.*, 2007) et reçoivent les apports les plus élevés de sédiments par unité de surface du bassin versant (Chappell *et al.*, 2004a) – ont tous besoin de protection. Dans les systèmes forestiers certifiés de la Malaisie péninsulaire, l'établissement de zones tampons étroites le long de petites rivières permanentes:

- réduit la possibilité pour les débusqueurs d'utiliser les petits cours d'eau comme route, limitant ainsi l'érosion du lit;
- exige l'établissement de ponceaux ou de ponts à tous les points d'intersection des chemins et des pistes avec les cours d'eau permanents, réduisant ainsi la perturbation du lit et interrompant certaines des voies empruntées par les sédiments glissant le long des pentes vers les cours d'eau;

- préserve le couvert forestier et, dès lors, le microclimat le long du parcours des voies d'eau.

Ces avantages considérables peuvent s'obtenir en limitant l'abattage et l'accès de véhicules dans une zone relativement limitée (moins de 10 pour cent) du paysage.

Bien que seules de rares études ont été menées sur les impacts hydrologiques des pratiques forestières dans les forêts naturelles tropicales, et ont formulé des stratégies d'atténuation, aucune ne s'est vraiment penchée sur la question de la turbidité des rivières dans les plantations tropicales (Bonell et Bruijnzeel, 2004; Chappell, Tych et Bonell, 2007). Il est urgent d'appliquer les résultats des études sur cette turbidité aux bassins versants comprenant des plantations, et d'entreprendre de nouvelles études à l'échelle du bassin versant sur ce problème et sur la qualité de l'eau dans les plantations de bois d'œuvre ou de palmiers à huile. La recherche hydrologique permettrait aussi de comparer la valeur et les impacts économiques de zones tampons de différentes dimensions dans les terrains destinés aux plantations forestières ou aux systèmes agroforestiers. ♦



Bibliographie

- Bonell, M. et Bruijnzeel, L.A.** 2004. *Forests, water and people in the humid tropics*. Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press.
- Bren, L.J.** 2000. A case study in the use of threshold measures of hydrologic loading in the design of stream buffer strips. *Forest Ecology and Management*, 132: 243–257.
- Cassells, D.S. et Bruijnzeel, L.A.** 2004. Guidelines for controlling vegetation, soil and water impacts of timber harvesting in the humid tropics. Dans M. Bonell et L.A. Bruijnzeel, éd., *Forests, water and people in the humid tropics*. Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press.
- Cassells, D.S., Gilmour, D.A. et Bonell, M.** 1984. Watershed forest management practices in the tropical rainforests of north-eastern Australia. Dans C.L. O'Loughlin et A.J. Pearce, éd., *Effects of land use on erosion and slope stability*. Vienne, Autriche,



Zone tampon dans le bassin versant expérimental de Baru, 17 ans après la première coupe d'écrémage

- Union internationale des instituts de recherches forestières (IUFRO).
- Chappell, N.A., Douglas, I., Hanapi, J.M. et Tych, W.** 2004a. Source of suspended-sediment within a tropical catchment recovering from selective logging. *Hydrological Processes*, 18: 685–701.
- Chappell, N.A., Thang, H.C., Sinun, W. et Bidin, K.** 2007. Practical hydrological protection of tropical forests: Malaysia's scientific contribution. Presented at the International Conference on Nature Conservation in Sabah: the Quest for the Gold Standard, Kota Kinabalu, Sabah, Malaisie, 26–27 novembre.
- Chappell, N.A., Tych, W. et Bonell, M.** 2007. Development of the *forSIM* model to quantify positive and negative hydrological impacts of tropical reforestation. *Forest Ecology and Management*, 251: 52–64.
- Chappell, N.A., Tych, W., Yusop, Z., Rahim, N.A. et Kasran, B.** 2004b. Spatially-significant effects of selective tropical forestry on water, nutrient and sediment flows: a modelling-supported review. Dans M. Bonell et L.A. Bruijnzeel, éd., *Forests, water and people in the humid tropics*. Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press.
- Chappell, N.A., Vongtanaboon S., Jiang, Y. et Tangtham, N.** 2006. Return-flow prediction and buffer designation in two rainforest headwaters. *Forest Ecology and Management*, 224: 131–146.
- Davies, P.E. et Nelson, M.** 1994. Relationship between riparian buffer widths and the effects of logging on stream habitat, invertebrate community composition, and fish abundance. *Australian Journal of Marine and Freshwater Research*, 45: 1289–1305.
- Douglas, I., Bidin, K., Balamurgan, G., Chappell, N.A., Walsh, R.P.D., Greer, T. et Sinun, W.** 1999. Role of extreme events in the impacts of selective tropical forestry on erosion during harvesting and recovery phases at Danum Valley, Sabah. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B.*, 354: 1749–1761.
- FAO.** 1996. *Code modèle FAO des pratiques d'exploitation forestière*, par D.P. Dykstra et R. Heinrich. Rome.
- FAO.** 1999. *Code of practice for forest harvesting in Asia-Pacific*, par P.B. Durst. RAP Publication 1999/12. Bangkok, Thaïlande, Bureau régional de la FAO pour l'Asie et le Pacifique.
- Forestry Department Peninsular Malaysia.** 1999. *Specification of forest roads for Peninsular Malaysia*. Kuala Lumpur, Malaisie.
- Hamilton, L.S.** 2004. Red flags of warning in land clearing. Dans M. Bonell et L.A. Bruijnzeel, éd., *Forests, water and people in the humid tropics*. Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press.
- Mannan, S. et Awang, Y.** 1997. Sustainable forest management in Sabah. Presented at the Seminar on Sustainable Forest Management, Kota Kinabalu, Sabah, Malaisie, 22 novembre 1997.
- McDowell, W.H.** 2001. Hurricanes, people, and riparian zones: controls on nutrient losses from forested Caribbean watersheds. *Forest Ecology and Management*, 154: 443–451.
- McKergow, L.A., Prosser, I.P., Grayson, R.B. et Heiner, D.** 2004. Performance of grass and rainforest riparian buffers in the wet tropics, Far North Queensland. 2. Water quality. *Australian Journal of Soil Research*, 42: 485–498.
- Megahan, W.F.** 1977. Reducing erosional impacts of roads. Dans *Aménagement des bassins versants*. Rome, FAO.
- MTCC.** 2001. *Malaysian criteria, indicators, activities and standards of performance for forest management certification (MC&I)*. Kuala Lumpur, Malaisie, Malaysia Timber Certification Council (MTCC).
- MTCC.** 2004. *Malaysian criteria and indicators for forest management certification (MC&I, 2002)*. Kuala Lumpur, Malaisie
- MTCC.** 2007. *Malaysian criteria and indicators for forest management certification (forest plantations)*. Kuala Lumpur, Malaisie. (Version préliminaire, 27 mars.)
- Nik, A.R. et Harding, D.** 1992. Effects of selective logging methods on water yield and streamflow parameters in Peninsular Malaysia. *Journal of Tropical Forest Science*, 5: 130–154.
- Pinard, M.A., Putz, F.E. et Tay, J.** 2000. Lessons learned from the implementation of reduced-impact logging in hilly terrain in Sabah, Malaisie. *International Forestry Review*, 2: 33–39.
- Sabah Forestry Department.** 1998. *RIL operation guide book: specifically for tracked skidder use*. Sandakan, Malaisie.
- Sidle, R.C., Sasaki, S., Otsuki, M., Noguchi, S. et Nik, A.R.** 2004. Sediment pathways in a tropical forest: effects of logging roads and skid trails. *Hydrological Processes*, 18: 703–720.
- Sist, P., Dykstra, D. et Fimbel, R.** 1998. *Reduced-impact logging guidelines for lowland and hill dipterocarp forests in Indonesia*. Occasional Paper N. 15. Bogor, Indonésie, Centre pour la recherche forestière internationale (CIFOR).
- Thang, H.C.** 1987. Forest management-systems for tropical high forest, with special reference to Peninsular Malaysia. *Forest Ecology and Management*, 21: 3–20.
- Thang, H.C.** 1996. Formulation and implementation of criteria and indicators for sustainable forest management in Malaysia. Dans S. Appanah, M. Shamsudin, H.C. Thang et I. Parlan, éd., *Proceedings of the Workshop on Forest Management Certification*, Kuala Lumpur, Malaisie, 12–13 décembre 1996. Kuala Lumpur, Forestry Research Institute of Malaysia (FRIM).
- Thang H.C. et Chappell, N.A.** 2004. Minimising the hydrological impact of forest harvesting in Malaysia's rain forests. Dans M. Bonell et L.A. Bruijnzeel, éd., *Forests, water and people in the humid tropics*. Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press.
- Yusop, Z.** 1989. Effects of selective logging methods on dissolved nutrient exports in Berembun Watershed, Peninsular Malaysia. Dans *Proceedings of the Regional Seminar on Tropical Forest Hydrology*, Kuala Lumpur, Malaisie, 4–9 septembre 1989. Kuala Lumpur, FRIM.
- Ziegler, A.D., Tran, L.T., Giambelluca, T.W., Sidle, R.C., Sutherland, R.A., Nullet, M.A. et Tran, D.V.** 2006. Effective slope lengths for buffering hillslope surface runoff in fragmented landscapes in northern Vietnam. *Forest Ecology and Management*, 224: 104–118. ♦