



Effet de la gestion sur les services écosystémiques des forêts hétérogènes de montagne :

Analyse du compromis production- biodiversité par simulation

Valentine Lafond – Benoît Courbaud – Thomas Cordonnier

Pour mieux
affirmer
ses missions,
le Cemagref
devient Irstea



www.irstea.fr

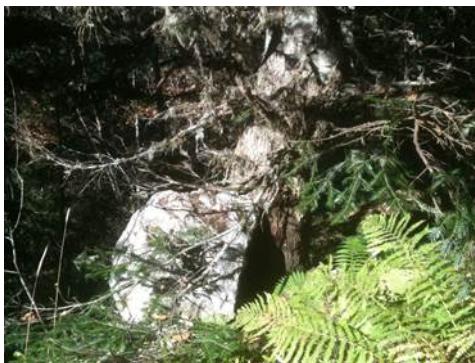


CAQSI 2014



Introduction

- Des forêts de montagne très multifonctionnelles qui rendent de nombreux services écosystémiques (SE)
- Production de bois
- Stockage de carbone
- Protection (chute de blocs, érosion, avalanches...)
- Réservoir de biodiversité
- Recréation
- Esthétique...



Introduction

■ Produire (plus) mieux tout en préservant mieux la biodiversité ?

(Assises de la forêt 2006, Grenelle 2007)

PRODUIRE MIEUX

- Augmentation des prélèvements ?
- Mieux répondre à la demande industrielle
- Vers une gestion plus « dynamique » ?

(Legay et al. 2007)

- ↓ Diminuer Diamètre d'exploitabilité
- ↓ Diminuer Stock (et gros bois)

MIEUX PRÉSERVER LA BIODIVERSITÉ

- Favoriser l'hétérogénéité des forêts ?
 - Espèces, tailles, structure spatiale
 - Diversité de niches
 - Conserver les attributs favorables à la biodiversité (Bauhus et al. 2009)
 - Gros et très gros bois
 - Bois mort (sol / debout)
 - Arbres porteurs de micro-habitats
- (Lassauce et al. 2011; Vuidot et al. 2011; Winter et Möller 2008)



Introduction

■ Questions

- Quels leviers de dynamisation en futaie irrégulière ?
- Quels effets sur les différents SE?



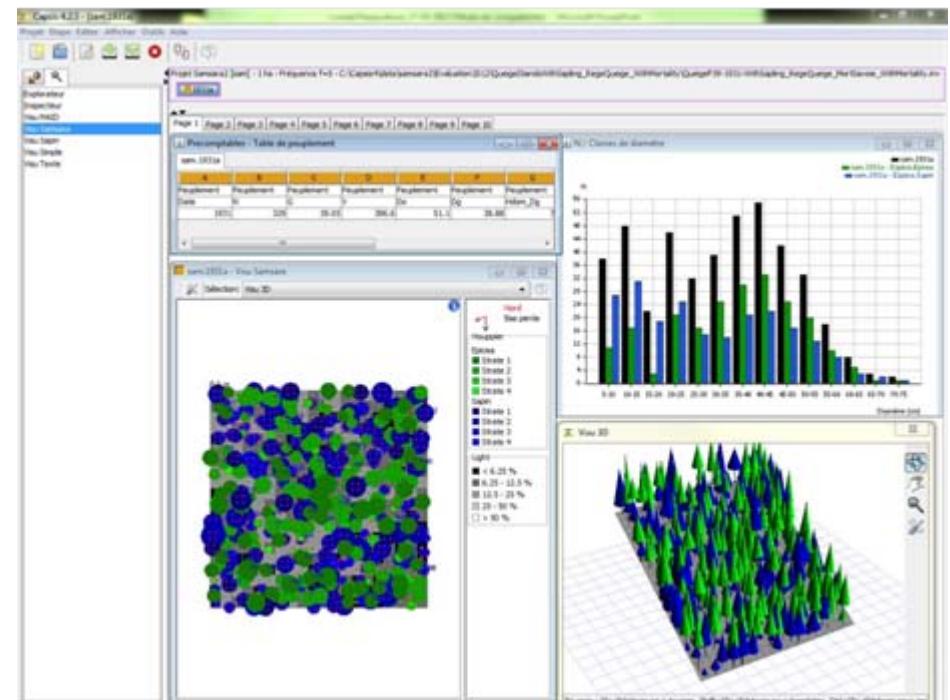
■ Hypothèses

- Les indicateurs répondent différemment à la gestion
⇒ Situations de compromis entre indicateurs
- Compromis assurés par gestion d'intensité intermédiaire ?



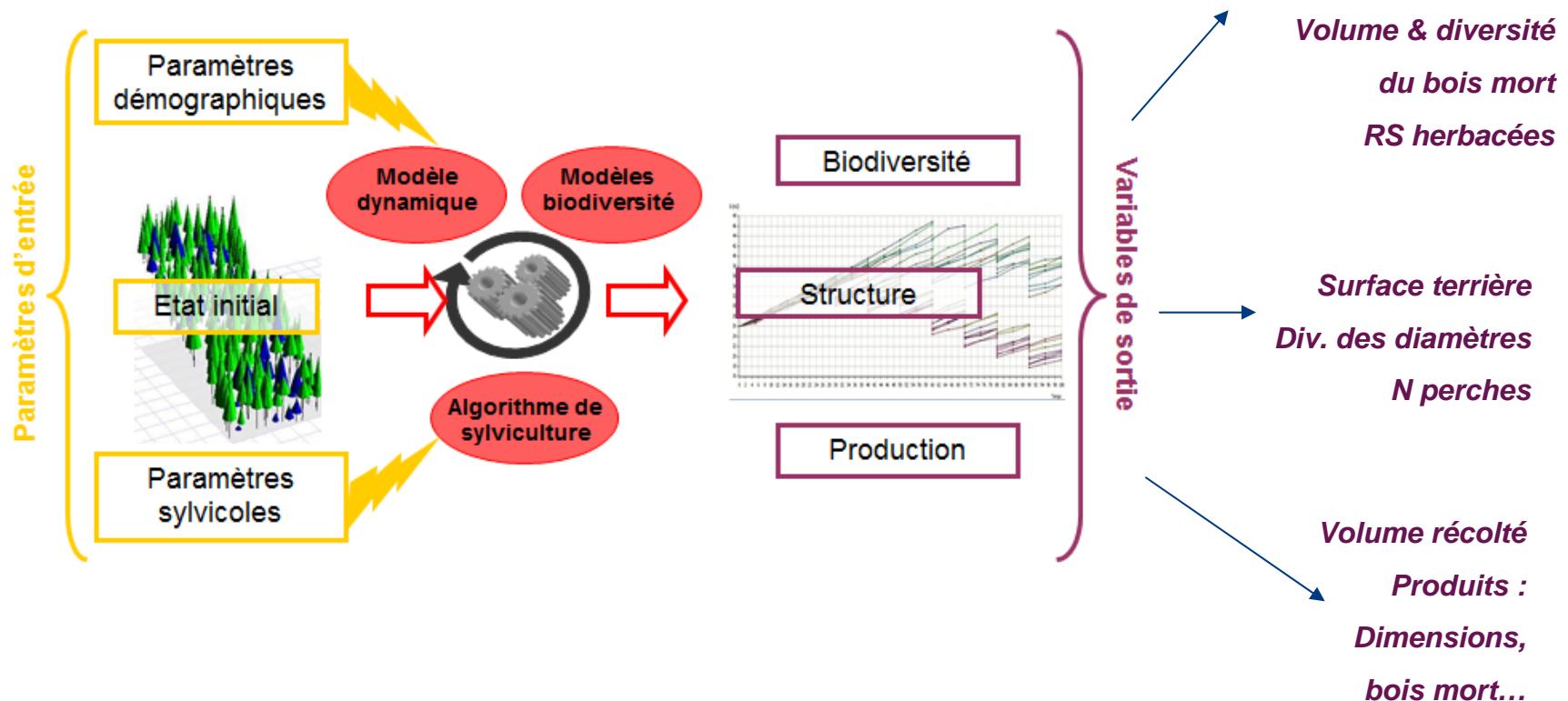
Matériel et méthode

- **Modèle de dynamique forestière**
 - Individu centré
 - Spatialement explicite
- **Processus démographiques**
 - Croissance, mortalité, régénération
 - Interception lumière
- **Sous modèles d'indicateurs**
 - Décomposition du Bois mort
 - Richesse spécifique flore de sous bois
- **Algorithme de sylviculture**
 - 15 paramètres
 - Sélection individuelle / groupes



Plateforme de simulation Capsis4

Matériel et méthode



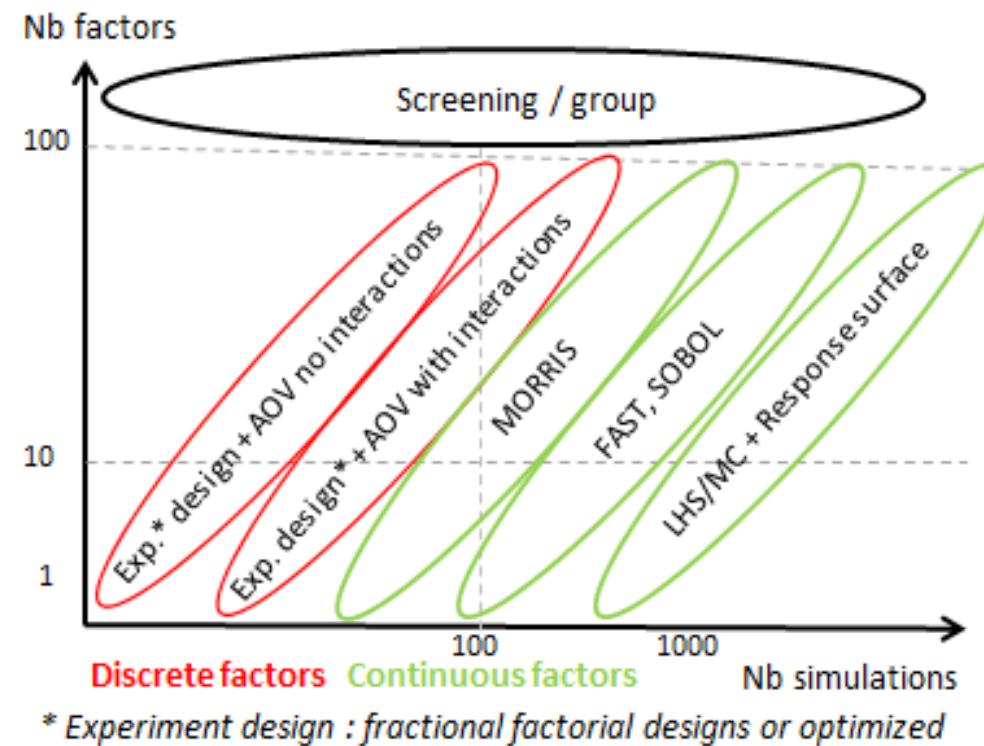
Analyse de sensibilité

Réponse des indicateurs de sortie aux variations des facteurs d'entrée

Analyse multicritères
Compromis / synergie entre indicateurs

AS : méthode

- Choix de la technique d'analyse de sensibilité (AS)
 - Nombreuses techniques disponibles
 - Forte contrainte = temps de simulation



Adapted from S. Mahévas

 MEXICO

AS n° 1: Méthode de Morris

(Morris 1991; Campolongo et al. 2007)

Objectif : screening
déetecter les facteurs influents / réduire le nb de facteurs

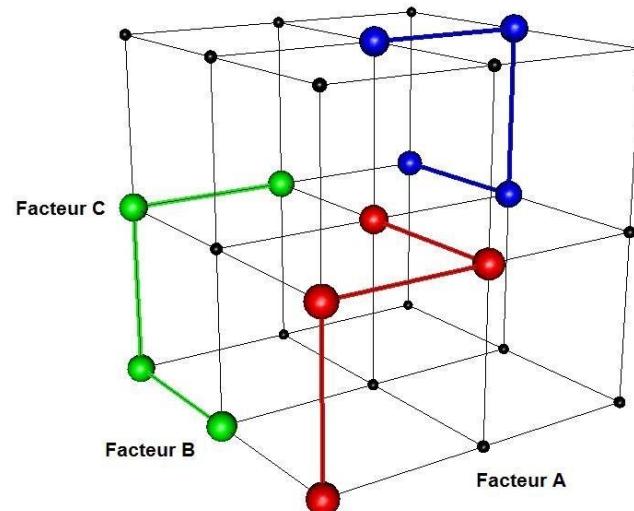
42 paramètres de Samsara2

15 paramètres de l'algorithme de sylviculture

(G prélevée standard, max et min / D exploit / D éclaircie / Tx récolte max
 / Tx éclaircie max / S trouées / Tx Bois mort récolté / Nb gros arbres préservés biodiv)

5 facteurs «état initial» à 2 niveaux

(Densité / Structure / Tx mélange / Expo / Pente) => 32 peuplements initiaux virtuels



$$r^*(p+1) = 100^* (62+1)$$

= 6300 combinaisons

Résultats AS Morris

■ Indices de Morris

Elementary Effects (EE)

- Effet moyen : μ^*
- Variabilité : σ

(non linéarité ou interactions)

■ Indice de Sensibilité

- Combinant les 2 $eDist = \sqrt{\mu^{*2} + \sigma^2}$

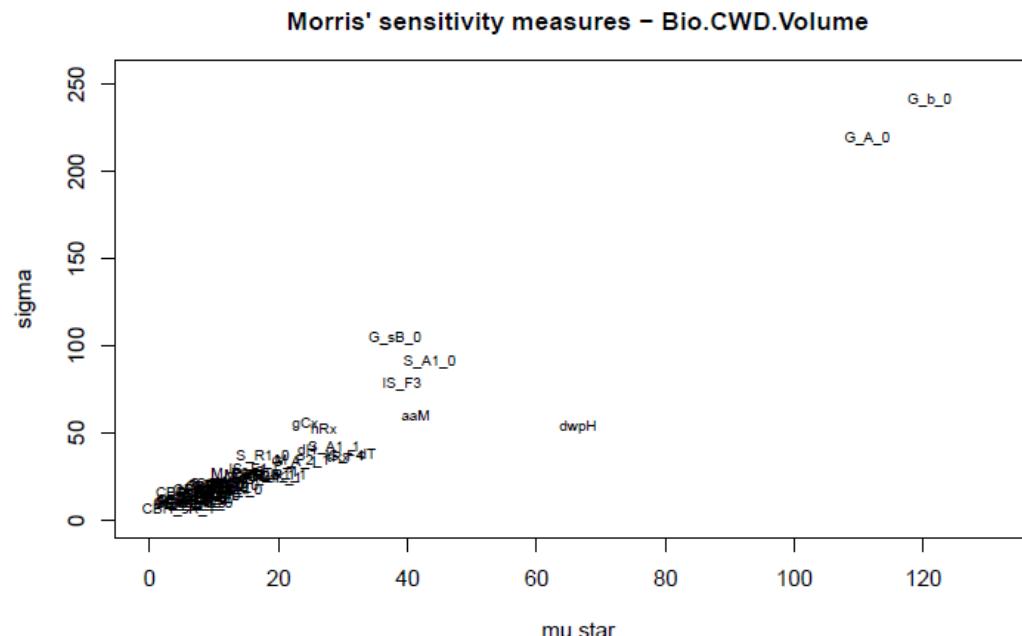
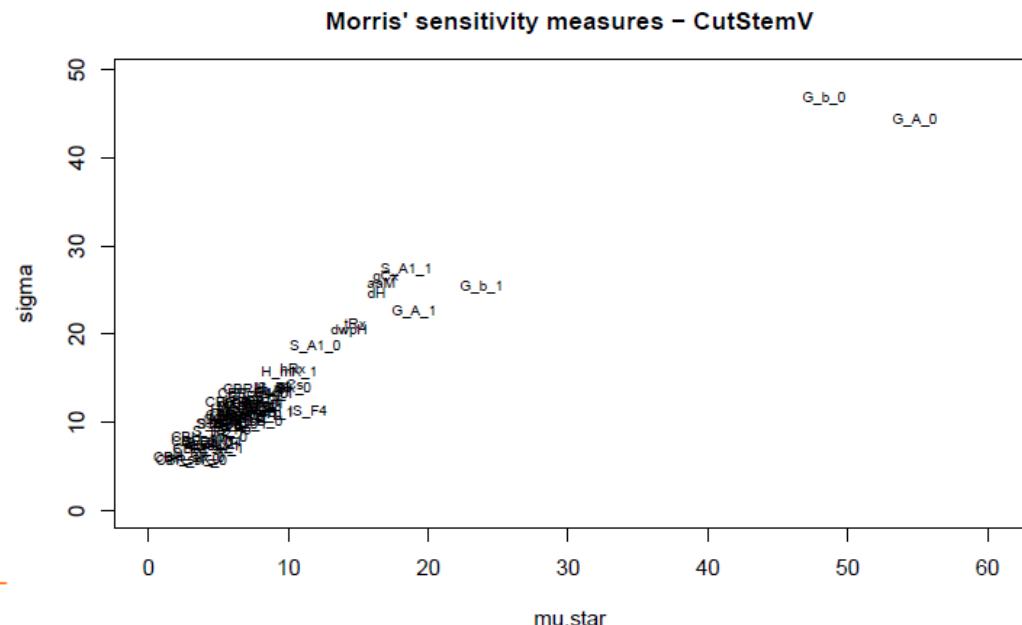
(Ciric et al. 2012)

⇒ Rang des facteurs / variables

⇒ Rang global (somme des rangs)

■ Résultats :

- Hiérarchisation des facteurs
- Définition du niveau d'influence
 - non ou peu influents => fixés



AS Morris

Variables de sortie

Paramètres sylvicoles

Facteurs état initial

Paramètres Samsara2

Factor Type		Factor Description		Factor Code		Global Productivity & Yield Metrics																		Global Health & Risk Indicators																	
		N	G	Dg	Gt	Gr	Ge	Pw	Wk	Rk	D	Nw	T	Cwd	Fwd	Dw	Rs	Sg	Dg	Nb	Rs	Scap	Mean	Rs	Hllo	Mean	Rs	Inter	SD	Rs	Stap	Ag	Bion	Cur	Crng	Crng	% XLT	Timber	% Prod	Script Prod	Sum of Ranks
Management Algorithm	Harvest D	dH	6	6	8	6	4	6	9	14	12	13	10	8	10	6	9	9	8	5	3	5	6	12	7	9	7	6	204	5											
	Thinning D	dT	8	16	16	15	9	20	17	24	23	10	18	4	14	17	23	18	19	18	15	16	16	8	16	15	12	14	401	12											
	Max Cut	gCx	25	15	13	21	15	25	35	34	6	8	12	9	7	23	19	11	13	19	21	14	5	9	30	6	12	430	14												
	Standard Cut	gCs	17	12	10	11	12	17	20	23	16	27	15	15	30	20	29	13	25	30	11	14	14	38	11	17	47	506	17												
	Min Cut	gCh	29	21	21	18	19	33	31	33	28	30	30	19	29	27	22	26	37	20	17	30	22	10	2	6	4	5	568	18											
	Max Harv. %	hrX	9	10	6	5	8	13	18	15	4	9	13	7	8	12	8	12	10	12	6	10	12	11	44	35	11	28	336	16											
	Max. Thin. %	trX	5	3	3	4	5	7	8	12	13	14	11	5	7	5	4	7	7	3	9	5	3	5	3	3	5	3	168	4											
	Species WP	sWP	26	35	27	20	17	12	7	10	33	29	32	33	18	26	19	29	22	11	10	35	30	24	14	20	11	557	17												
	Harv. WP	hdWP	43	40	35	25	32	39	26	25	29	39	50	22	48	36	42	36	36	31	36	38	44	27	24	26	27	632	26												
	Thinn. WP	tdWP	44	47	38	17	7	21	23	19	47	31	42	37	38	50	45	32	51	44	49	48	42	49	46	37	49	41	994	40											
Initial State Factors	Mix. Ratio.	mR	40	38	25	23	26	15	9	40	28	23	18	39	22	33	23	23	20	10	14	40	40	39	34	29	35	763	27												
	Gap Size	aAM	4	7	4	3	1	1	4	4	3	7	6	13	6	1	1	3	2	1	7	8	4	6	5	9	8	121	3												
	Buffer dist.	dB	45	48	42	45	45	47	51	49	44	44	49	50	45	42	46	43	49	42	37	50	36	50	58	59	51	29	1196	51											
	Nb Bio Trees	nbT	32	24	19	7	13	24	22	10	21	26	17	34	30	25	41	27	23	29	23	26	21	19	18	40	19	618	20												
	Dead Wood %	dW	22	14	15	26	10	37	30	22	8	6	16	11	15	15	14	14	13	10	5	8	7	2	13	361	11														
	Density	IS_F1	16	17	14	14	38	9	14	17	17	19	20	25	25	14	17	16	35	17	27	17	28	23	52	38	30	43	602	19											
	Structure	IS_F2	12	22	20	13	16	11	24	30	19	26	19	29	31	19	24	17	45	29	24	22	31	29	30	28	39	34	643	23											
	Composition	IS_F3	18	11	11	23	41	8	3	5	7	5	9	23	5	8	11	8	11	12	21	15	57	53	14	30	428	13													
	Aspect	IS_F4	10	13	17	28	54	10	27	32	14	12	14	28	13	10	10	15	21	15	18	15	17	20	17	25	18	488	15												
	Slope	IS_F5	38	27	23	36	26	32	44	54	25	42	37	54	44	41	52	33	48	52	53	27	50	33	37	31	37	44	1020	44											
Growth	Scale param.	G_A_0	1	2	2	1	2	3	6	1	2	2	2	3	2	4	3	2	2	4	4	2	1	2	1	1	3	1	59	2											
		G_A_-1	15	5	7	10	11	15	11	6	9	17	4	11	17	21	10	6	6	27	41	6	7	6	4	4	20	90	290	9											
	Shape param.	G_b_0	3	1	1	2	3	4	5	3	1	1	2	1	5	6	1	1	3	2	1	2	1	3	2	1	2	58	1												
		G_b_-1	13	8	5	8	6	14	10	8	11	18	3	6	20	9	14	10	9	9	9	8	3	7	9	8	21	243	7												
	Individual Variability	G_sB_0	19	21	18	19	35	38	43	37	15	3	7	19	4	53	53	22	15	53	50	21	24	13	43	40	24	25	714	26											
		G_sB_1	33	43	24	16	46	52	40	47	22	20	17	43	55	48	54	52	53	54	42	33	34	31	27	22	44	2016	43												
		G_sL_0	58	55	56	58	56	61	56	61	55	57	62	55	62	61	62	62	61	55	57	60	59	54	60	52	1519	61													
		G_sL_1	57	60	61	56	57	60	57	58	62	56	57	59	60	58	61	57	61	60	57	61	55	62	54	51	61	60	1518	60											
Regeneration	Seed Rain	S_A1_0	7	9	12	12	24	2	2	7	5	4	8	12	3	3	4	4	7	1	5	9	11	18	36	42	25	18	290	8											
		S_A1_-1	2	4	9	9	14	5	1	2	10	11	5	16	9	2	2	7	5	6	8	4	4	4	16	12	16	26	7	212	6										
	Sapling Survival ~ Light	S_B1_0	51	51	54	52	49	35	48	38	42	32	43	21	28	49	50	46	32	43	48	49	47	46	70	60	34	56	1167	50											
		S_B1_-1	47	52	50	33	28	55	47	46	51	52	46	32	50	44	34	49	33	51	51	52	47	51	27	32	21	129	49												
	Sapling Height Growth	S_B2_0	52	39	36	49	47	31	34	39	31	36	47	53	23	51	49	31	41	32	44	39	45	46	20	14	35	9	973	38											
		S_B2_-1	42	45	39	44	42	49	39	48	53	54	39	36	41	40	51	53	49	49	34	45	43	35	18	13	50	57	1109	46											
		S_B3_0	54	46	49	50	48	52	44	52	43	53	56	41	49	54	47	44	44	46	42	44	54	52	61	62	49	52	1288	49											
		S_B3_-1	50	44	48	46	34	51	52	52	39	35	45	52	43	46	48	50	26	48	43	46	48	38	22	26	45	1119	47												
		S_R1_0	24	28	31	37	20	16	16	27	34	16	25	24	25	24	22	24	16	12	24	19	22	33	44	33	46	658	24												
		S_R1_-1	34	41	47	43	18	40	29	43	48	47	48	44	35	33	37	45	25	28	38	41	59	39	28	36	22	1007	42												
Mortality	Base mortality	M_P1_0	31	31	41	53	32	22	25	21	21	33	35	34	24	29	36	37	23	22	22	31	27	42	47	49	45	54	867	34											
		M_P1_-1	11	19	22	24	37	23	12	11	32	20	22	20	22	13	7	21	28	26	25	19	35	35	45	41	31	39	620	21											
	Diameter effect	M_P2_0	36	32	40	31	21	50	41	18	30	23	36	31	36	17	30	35	31	41	35	33	39	32	11	16	32	796	29												
		M_P2_-1	23	18	26	22	37	19	13	20	15	28	14	19	18	12	19	17	39	19	33	34	36	40	55	45	633	44													
	Competition effect	M_P3_0	30	30	51	54	20	28	31	35	49	51	46	40	32	31	27	42	24	19	29	28	37	32	37	33	36	930	37												
		M_P3_-1	14	20	29	29	19	21	13	16	37	25	34	40	21	16	28	25	18	25	16	24	20	37	48	36	40	792	57												
	Scale param.	H_MK_0	46	54	53	47	52	53	46	40	54	51	44	38	49	42	44	30	34	32	54	15	43	20	15	19	1033	45													
		H_MK_-1	35	37	43	35	31	45	36	50	41	46	21	42	51	35	41	40	27	36	37	13	44	48	45	38	50	977	39												
	Shape param.	H_r_0	27	25	33	42	40	46	33	26	49	31	47	46	39	33	28	34	36	31	28	38	20	17	44	20	888	35													
		H_r_-1	48	50	52	34	39	48	40	45	52	43	44	38	52	53	44	43	45	45	51	46	41	21	22	27	1121	48													
Height - Diameter (D) Allometry	Individual Variability	H_SK_0	61	56	50	59	61	56	58	59	57	61	60	51	56	58	58	55	57	58	59	53	59	41	47	51	1451	56													
		Shape param.	CBR_b_0	37	36	45	40	22	43	42	44	36	37	33	35	34	33	38	13	28	21	23	36	18	31	26	29	863	53												
			CBR_b_1	21	26	32	41	44	30	28	29	46	22	29	27	21	21	39	38	47	40	26	25	27	29	30	813	30													
	Scale param.	CBR_mK_0	24	34	34	38	30	19	45	51	27	33	40	33	31	26	34	28	26	31	34	31	27	29	30	38	908	36													
			CBR_mK_1	20	23	25	30	29	27	36	24	24	27	45	26	18	30</																								

Rang global (somme des rangs)

AS Morris

Rang des facteurs (lignes) pour chaque variable de sortie (colonne),
avec indication du degré d'influence (faible – blanc à très forte – gris foncé)

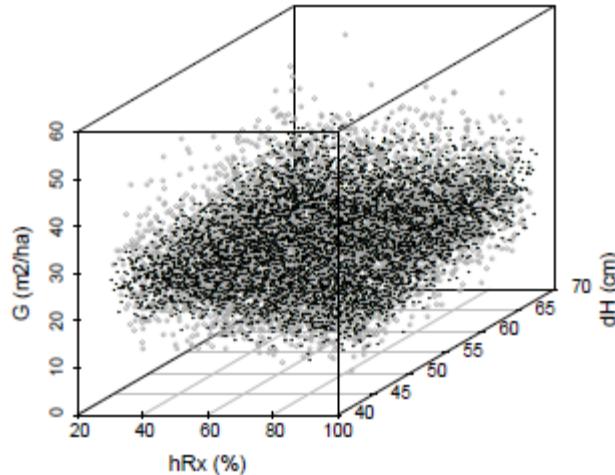
Factor Type	Factor Description	Factor Code	N	G	Dg	GiniG	ICE	PoleQty	PoleMixR	D	NVLT	FWD Vol.	CWD Vol.	DWDI	Snags D50 Nb	RS Sciap. Mean	RS Inter. Mean	RS Sciap. SD	RS Helio. Mean	RS Helio. SD	AG Biomass	Cut Stem7V	Cut Dg	% L Timber	% XL Timber	% Decl. Prod.	% Spruce Prod.	Sum of Ranks	Global Rank		
Management Algorithm	Harvest. D	dH	6	6	8	6	4	6	9	14	12	13	10	8	10	6	9	9	8	5	3	5	6	12	7	9	7	6	204	5	
	Thinning D	dT	8	16	16	15	9	20	17	24	23	10	18	4	14	17	23	18	19	18	15	16	16	8	16	15	12	14	401	12	
	Max. Cut	gCx	25	15	13	21	15	25	35	34	6	8	12	9	7	23	19	11	13	19	21	14	5	9	23	30	6	12	430	14	
	Standard Cut	gCs	17	12	10	11	12	17	20	23	16	27	15	15	30	20	29	13	12	25	30	11	14	14	38	11	17	47	506	16	
	Min. Cut	gCn	29	29	21	18	19	33	31	33	28	30	30	10	29	27	22	26	37	20	17	30	22	10	2	6	4	5	568	18	
	Max. Harv. %	hRx	9	10	6	5	8	13	18	15	4	9	13	7	8	12	8	12	10	12	6	10	12	11	44	35	11	28	336	10	
	Max. Thin. %	tRx	5	3	3	4	5	7	8	12	13	14	11	5	12	7	5	5	4	7	7	3	9	3	5	3	5	3	168	4	
	Species WP	sWP	26	35	27	20	17	12	7	10	33	29	32	33	18	26	16	29	22	11	10	35	30	24	14	10	20	11	557	17	
	Harv. WP	hdWP	43	40	35	32	25	39	26	25	29	39	50	22	48	36	42	36	36	31	36	38	44	17	24	26	27	16	862	32	
	Thinn. WP	tdWP	44	47	38	17	7	21	23	19	47	31	42	37	38	50	45	32	51	44	49	48	42	49	46	37	49	41	994	40	
	Mix. Ratio.	mrC	40	38	28	25	23	26	15	9	40	28	23	18	39	22	33	23	23	52	10	14	40	40	40	39	34	29	35	763	27
	Gap Size	aaM	4	7	4	3	1	1	4	4	3	7	6	13	6	1	1	3	3	2	1	7	8	4	6	5	9	8	121	3	
	Buffer dist.	dB	45	48	42	45	45	47	51	49	44	44	49	50	45	42	46	43	49	42	37	50	36	50	58	59	51	29	1196	51	
	Nb Bio Trees	nbT	32	24	19	7	13	24	22	20	18	21	26	17	34	30	25	41	27	23	29	23	26	21	19	18	19	40	618	20	
	Dead Wood %	dw pH	22	14	15	26	10	37	30	22	8	6	16	1	11	15	15	14	14	14	13	13	10	5	8	7	2	13	361	11	
Initial State Factors	Density	IS_F1	16	17	14	14	38	9	14	17	17	19	20	25	25	14	17	16	35	17	27	17	28	23	52	38	30	43	602	19	
	Structure	IS_F2	12	22	20	13	16	11	24	30	19	26	19	29	31	19	24	17	45	29	24	22	31	29	30	28	39	34	643	23	
	Composition	IS_F3	18	11	11	23	41	8	3	5	7	5	9	23	5	8	11	8	11	8	11	12	21	15	57	53	14	30	428	13	
	Aspect	IS_F4	10	13	17	28	54	10	27	32	14	12	14	28	13	10	15	21	15	18	15	17	20	17	25	18	15	488	15		
	Slope	IS_F5	38	27	23	36	26	32	44	54	25	42	37	54	44	41	52	33	48	52	53	27	50	33	37	31	37	44	1020	44	

(Extrait du tableau suivant...)

AS n°2 : Surfaces de réponse

- Objectif : Fonction de réponse de chaque indicateur?
 - Approche / Métamodèle
 - Analyser l'effet des facteurs et interactions
- Analyse centrée sur les paramètres influents
 - 13 paramètres de sylviculture (/15)
 - 2 paramètres démographiques par espèce (/44), variés en bloc pour les deux espèces
 - 1 paramètre de croissance
 - 1 paramètre de régénération
 - 3 facteurs « état initial » => 8 peuplements
 - Densité
 - Structure en diamètre
 - Composition
- Méthode d 'échantillonnage OA-LHS
 - Hypercubes latin avec propriétés de plan orthogonaux, 1 /peuplement (5000)

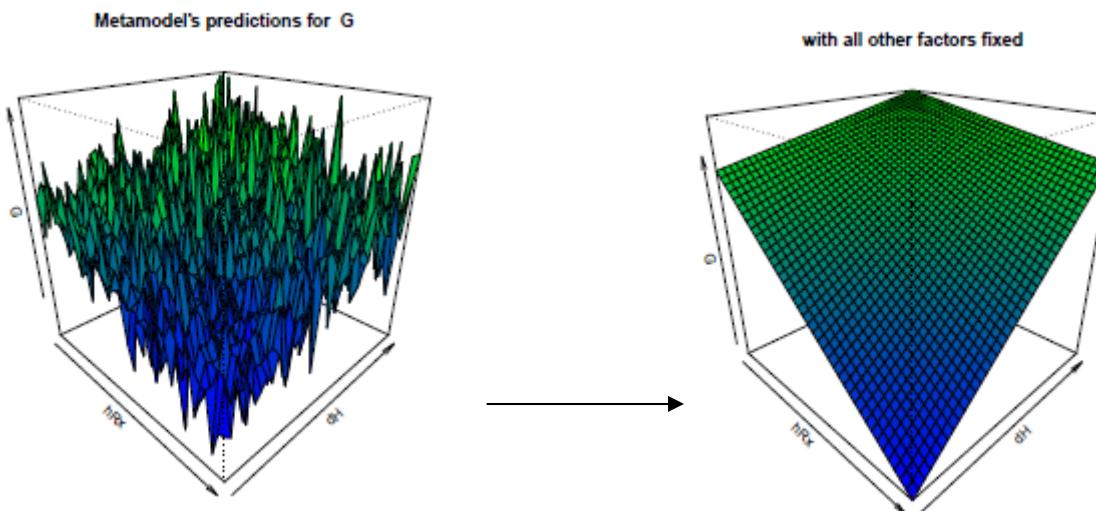
Surfaces de réponse



Méta-modèle
 $Y=f(\text{facteurs les plus influents})$

Sorties du modèle
(5000 simulations)

Pour chaque variable
(valeur moyenne sur les 50 dernières années)



Surface de réponse
On examine l'effet de
deux facteurs en fixant
tous les autres

Surfaces de réponse

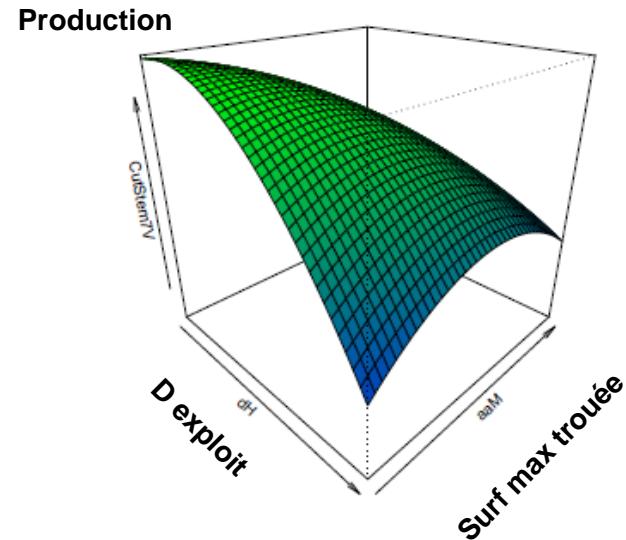
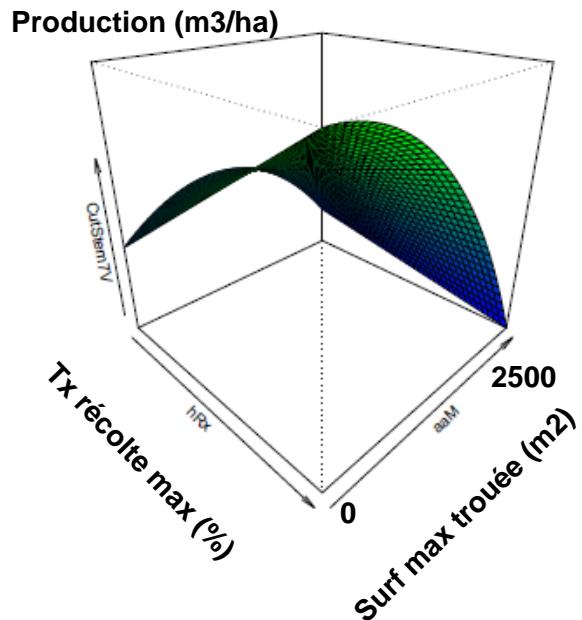
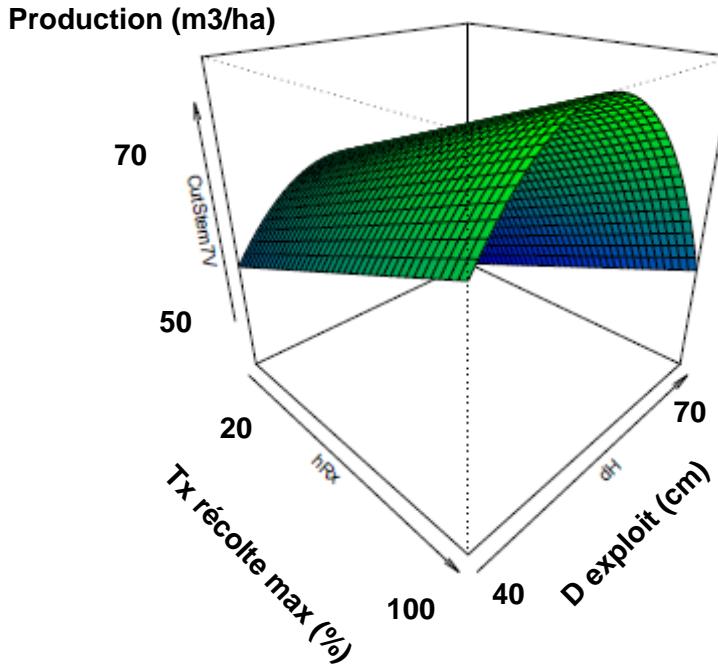
PRODUCTION (VOLUME RECOLTE)

Effets

Du Diamètre d'exploitabilité

Du taux de récolte max autorisé

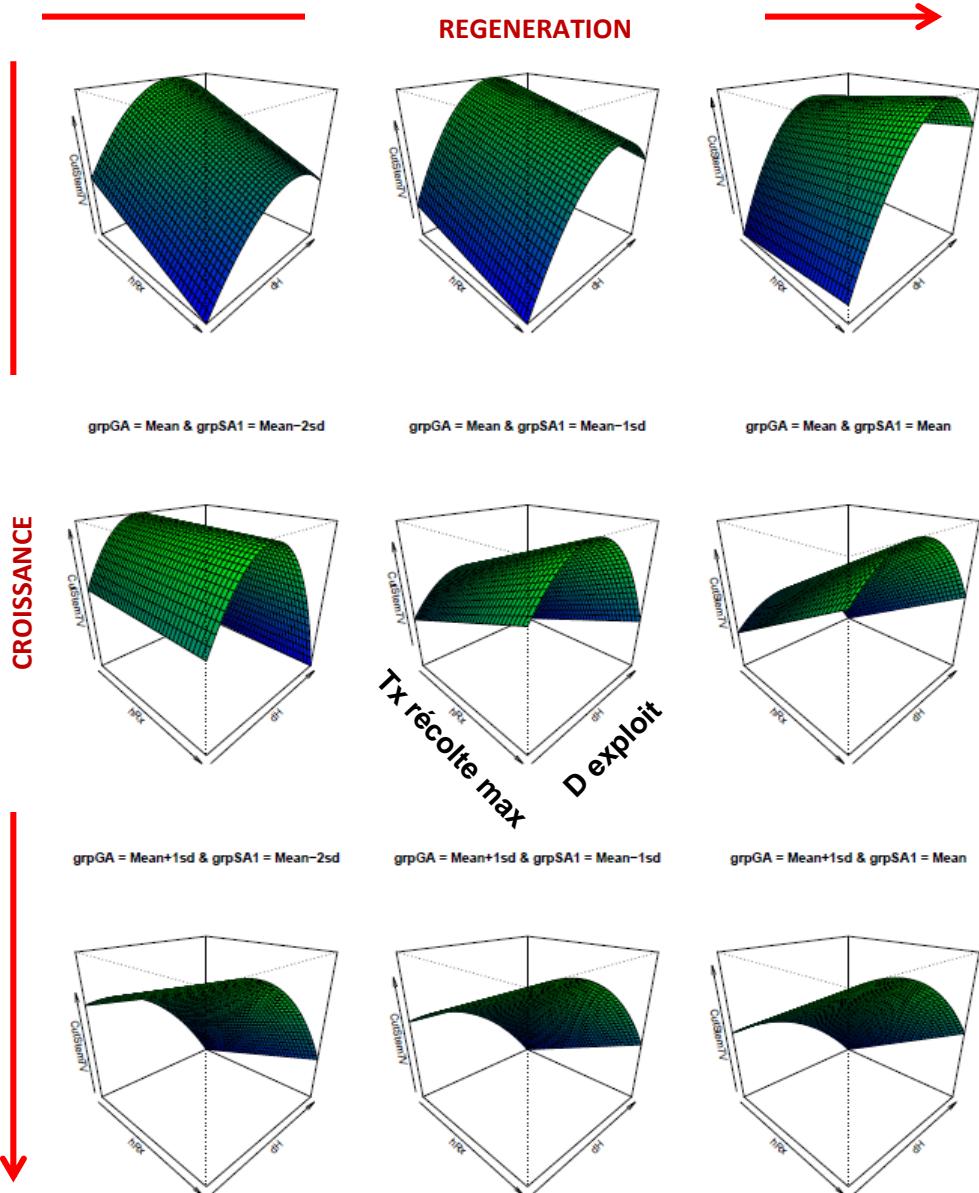
De la surf. de trouées



Surfaces de réponse

PRODUCTION

Interaction
avec
les facteurs
démographiques

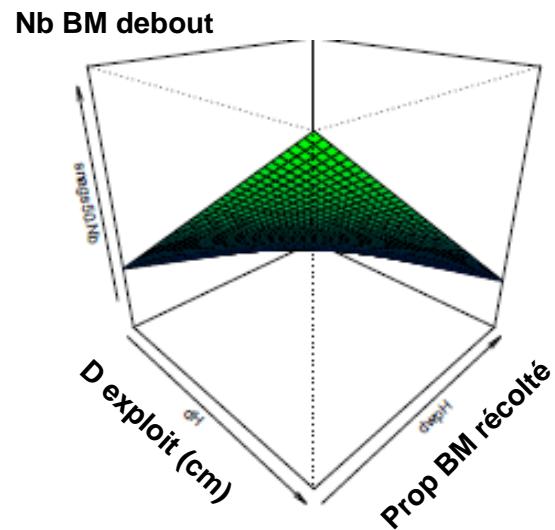
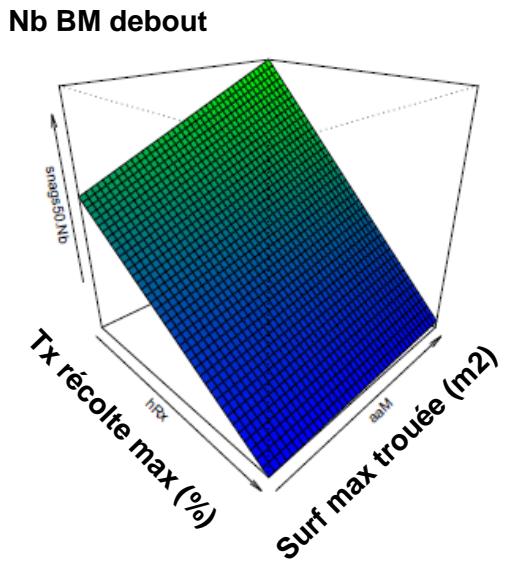
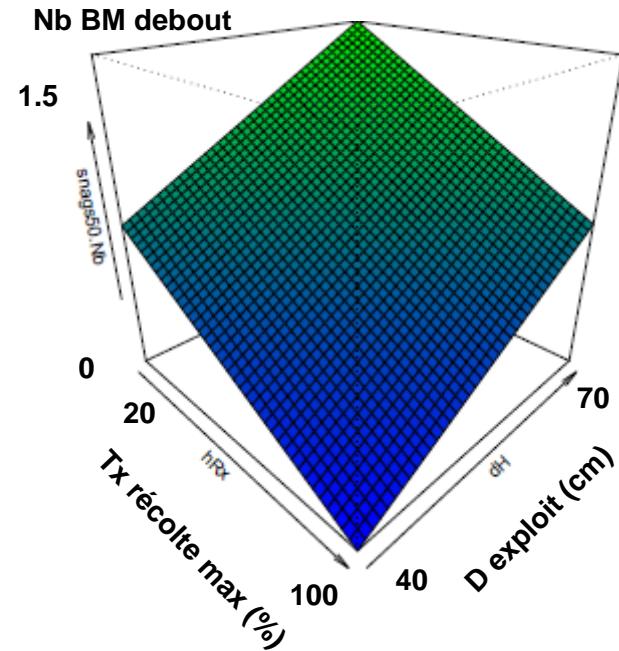


Surfaces de réponse

BIODIVERSITE (NB GROS BOIS MORTS DEBOUT)

Effets

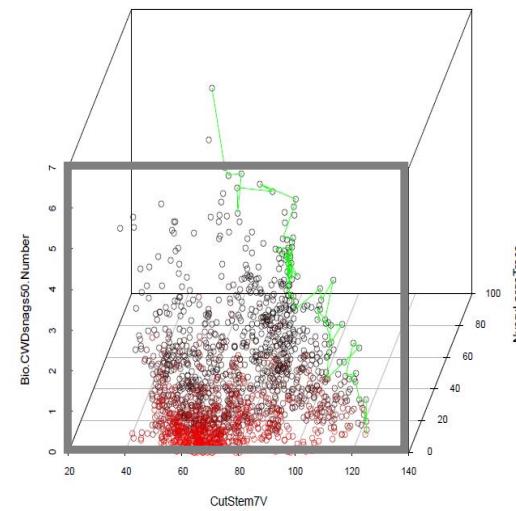
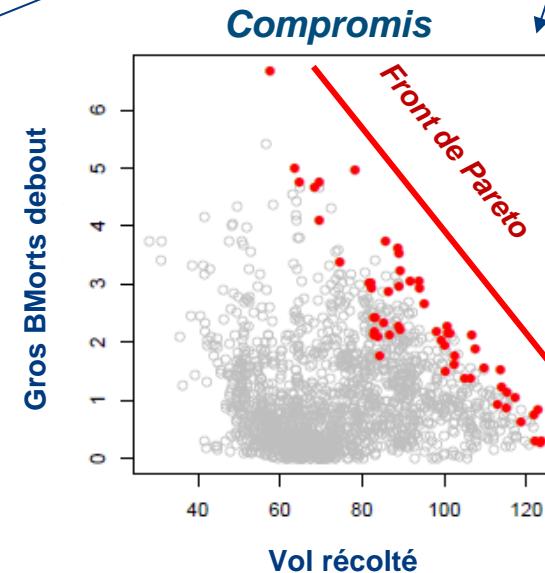
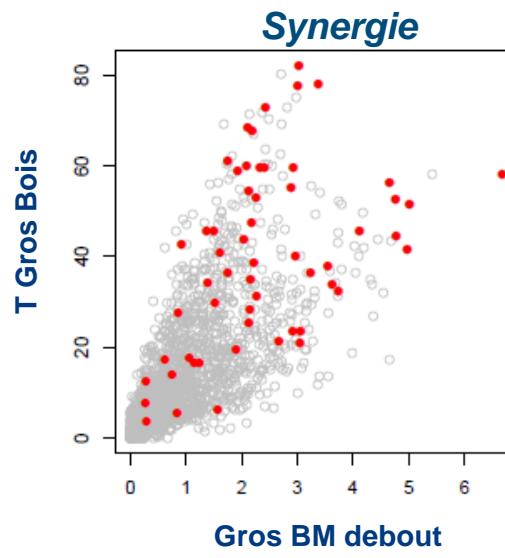
- Du Diamètre d'exploitabilité
- Du taux de récolte max autorisé
- De la surface des trouées
- De la proportion de BMort récolté



Analyse Multicritère

■ Analyse des compromis / fronts de Pareto

- Front de Pareto = ensemble des scenarii « non dominés »
- Recherche des fronts de Pareto sur 3 critères (3D)
- Analyse des fronts obtenus par projection 2D



Analyse Multicritères

Compromis

Entre Services

Ecosystémiques

*Production et
Biodiversité*

Compromis

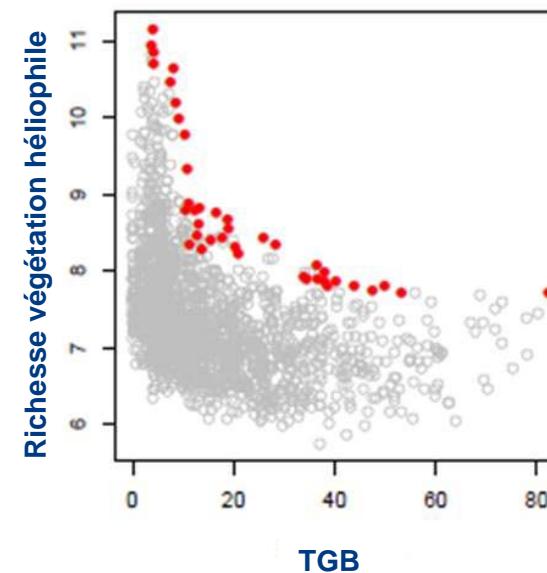
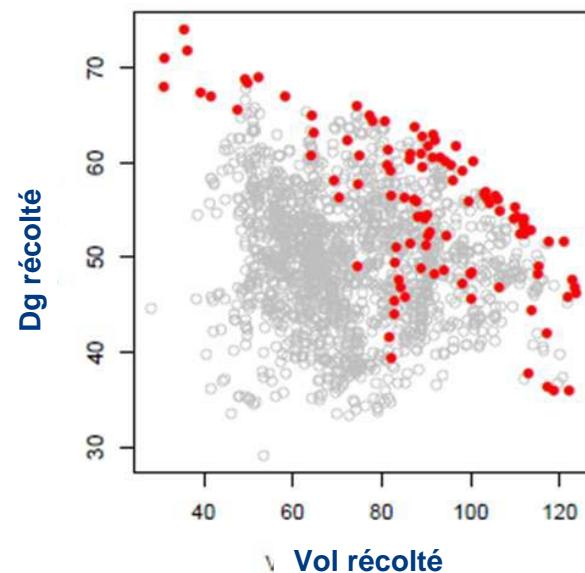
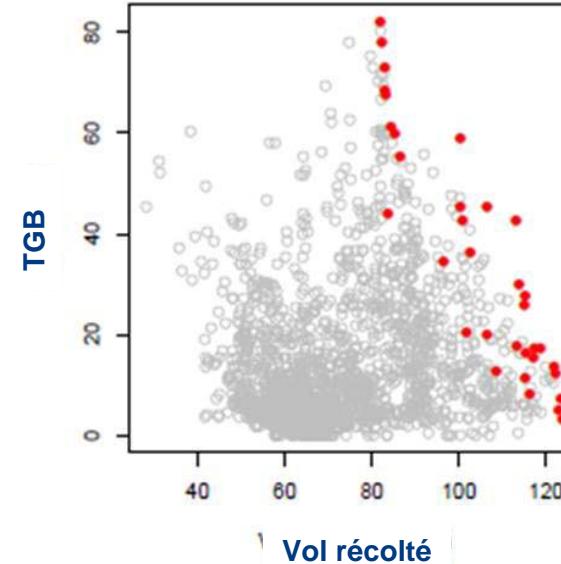
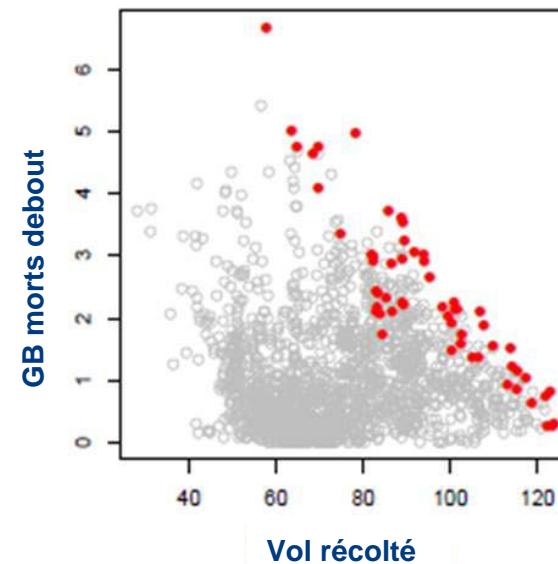
Au sein d'un

Service

écosystémique

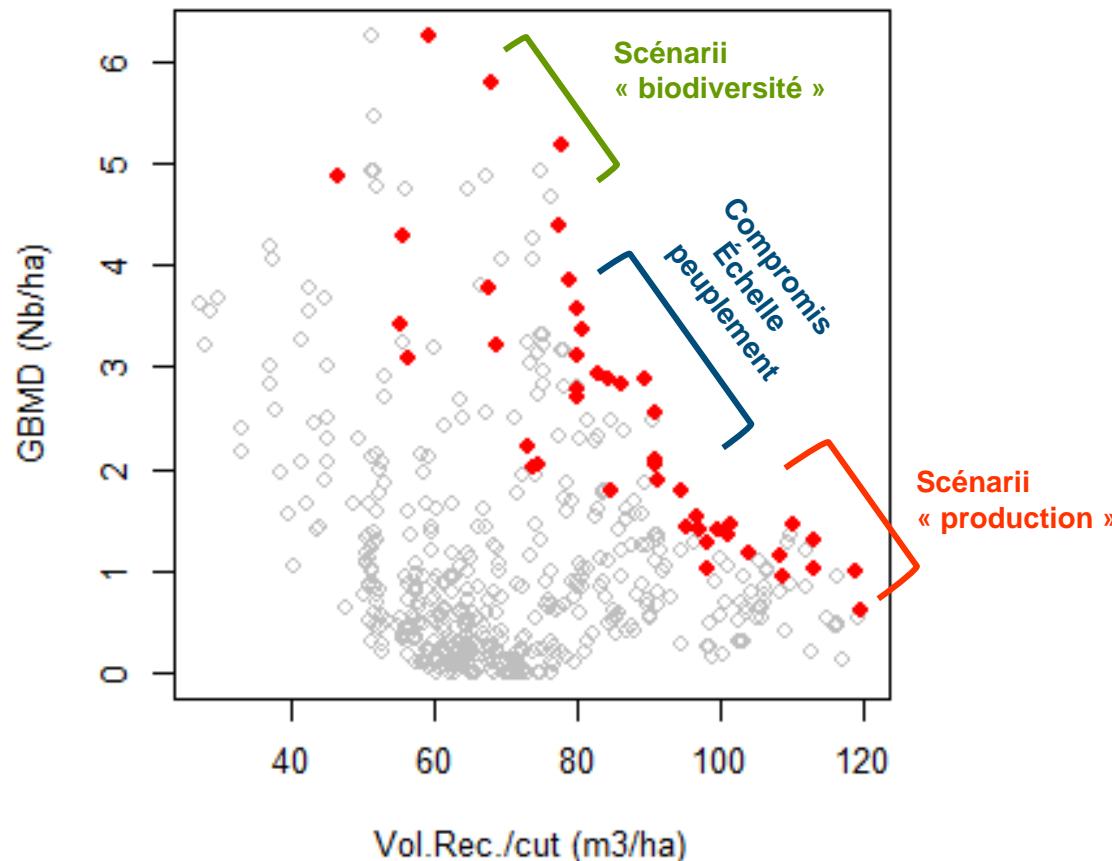
Prod x Prod

Biodiv x Biodiv



Analyse Multicritère

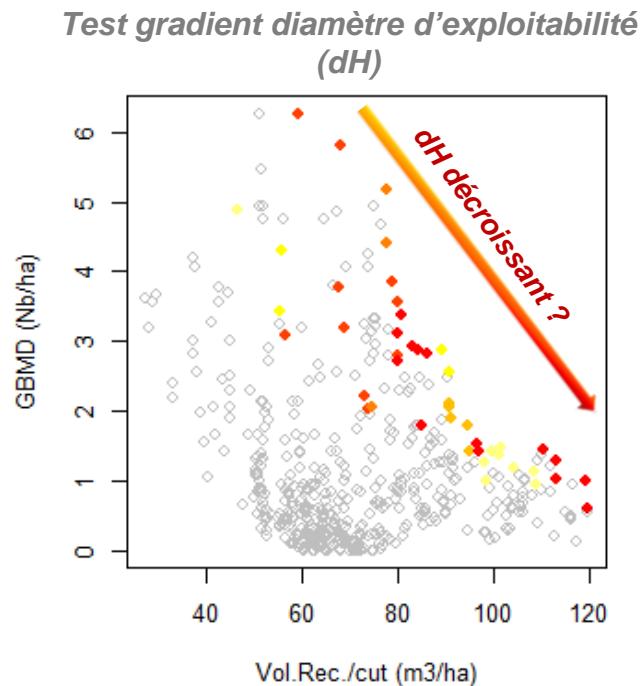
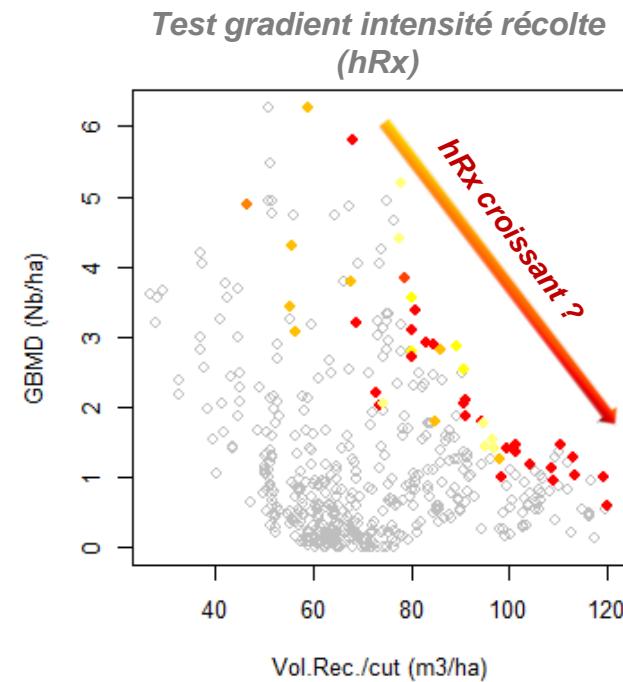
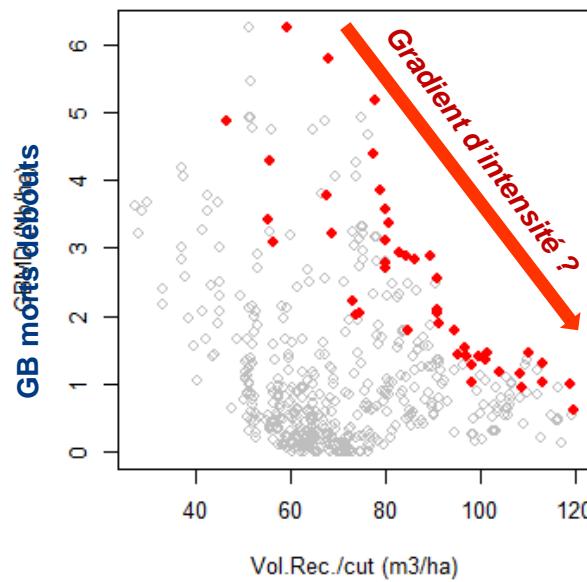
- Choix des scénarii de gestion & questions d'échelle ?
 - Recherche de compromis à l'échelle du peuplement
 - Ou à l'échelle du paysage/massif, via une mosaïque de peuplements +/- spécialisés



Analyse Multicritère

■ Interprétation des fronts de Pareto ?

⇒ Gradient d'intensité de gestion ?



⇒ Groupes de scénarii proches ?

⇒ Comprendre les interactions entre facteur

⇒ Fronts de Pareto dépendant du plan d'expérience

Références bibliographiques

- **Campolongo F, Cariboni J, Saltelli A (2007)** An effective screening design for sensitivity analysis of large models. Environmental Modelling & Software 22:1509-1518
- **Ciric C, Ciffroy P, Charles S (2012)** Use of sensitivity analysis to identify influential and non-influential parameters within an aquatic ecosystem model. Ecol Model 246:119-130
- **Courbaud B., de Coligny F. & Cordonnier T. 2003.** Simulating radiation distribution in a heterogeneous Norway spruce forest on a slope. Agricultural and Forest Meteorology, 116 :1-18.
- **Courbaud B., Goreaud F., Dreyfus P. et Bonnet F.R. 2001.** Evaluating thinning strategies using a Tree Distance Dependent Growth Model: Some examples based on the CAPSIS software "Uneven-Aged Spruce Forests" module. Forest Ecology and Management, 145:15-28.
- **de Coligny, F. 2005.** CAPSIS: Computer-Aided Projection for Strategies in Silviculture, a software platform for forestry modellers. In Workshop on Information Science for Agriculture and Environment (ISAE), GuiZhou Normal University, GuiYang, P.R. China.
- **Dufour-Kowalski S., B. Courbaud, P. Dreyfus, C. Meredieu and F. de Coligny, 2012.** Capsis: an open software framework and community for forest growth modelling. Ann. For. Sci. 69(2): 221-233.
- **Gauquelin, X. et B. Courbaud, 2006.** Guide des sylvicultures de montagne - Alpes du Nord françaises, Cemagref, CRPF Rhône-Alpes, ONF.
- **Goreaud, F., F. De Coligny, B. Courbaud, J.F. Dhote, P. Dreyfus et T. Perot 2005.** La modélisation : un outil pour la gestion et l'aménagement en forêt. Vertigo. 6:12.
- **Holeksa J, Zielonka T, Zywiec M, 2008.** Modeling the decay of coarse woody debris in a subalpine Norway spruce forest of the West Carpathians, Poland. Can J For Res-Rev Can Rech For 38:415-428
- **Lafond, V., Lagarrigues, G., Cordonnier, T., et Courbaud, B. 2013, accepted.** Uneven-aged management options to promote forest resilience for climate change adaptation: effects of group selection and harvesting intensity. Ann For Sci

Références bibliographiques

- **Morris, M. 1991.** Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments. *Technometrics* 33, 161-174.
- **Peng, C. 2000.** Understanding the role of forest simulation models in sustainable forest management. *Environmental Impact Assessment Review*. 20: 481-501.
- **Pretzsch, H., R. Grote, B. Reineking, T. Rotzer et S. Seifert 2008.** Models for forest ecosystem management: A European perspective. *Annals of Botany*. 101:1065-1087.
- **Reynolds, M.R, Burk, T.E., Huang , W.C. 1988.** Goodness-of-FiT tests and Model Selection Procedures for Diameter Distribution Models. *Forest Science*, 34(2): 373-399.
- **Saltelli A, Ratto M, Andres F, Campolongo F, Cariboni J, Gatelli D, Saisana M, Tarantola S (2008)** Global sensitivity analysis. The primer. John Wiley and Sons.
- **Schütz, J.P. 1997.** Sylviculture 2. La gestion des forets irrégulières et mélangées. Presses polytechniques et universitaires romandes. 178 p.
- **Seidl R, Rammer W, Lexer MJ, 2011a.** Adaptation options to reduce climate change vulnerability of sustainable forest management in the Austrian Alps. *Can J For Res* 41:694-706
- **Seidl R, Schelhaas MJ, Lexer MJ, 2011b.** Unraveling the drivers of intensifying forest disturbance regimes in Europe. *Global Change Biology* 17:2842-2852
- **Zilliox C, Gosselin F,2013.** Tree species diversity and abundance as indicators of understory diversity in French mountain forests: Variations of the relationship in geographical and ecological space. *For Ecol Manage Online First*