



Carlo Carmagnola

**Optimisation de la production
de neige de culture :
un outil d'aide à la décision**



LA PROBLEMATIQUE

- La neige de culture joue un rôle crucial dans l'exploitation des domaines skiables
- Aujourd'hui la production de neige de culture est gérée de façon empirique

Référence = Volumes d'eau consommés lors de la saison la plus sèche

- Cette approche n'est pas idéale

Saison froide et bien arrosée = Tendance à trop produire



LA METHODE

Optimiser la production de neige de culture

Algorithme permettant d'ajuster les quantités de neige à produire au cours de la saison, en fonction des apports en neige naturelle

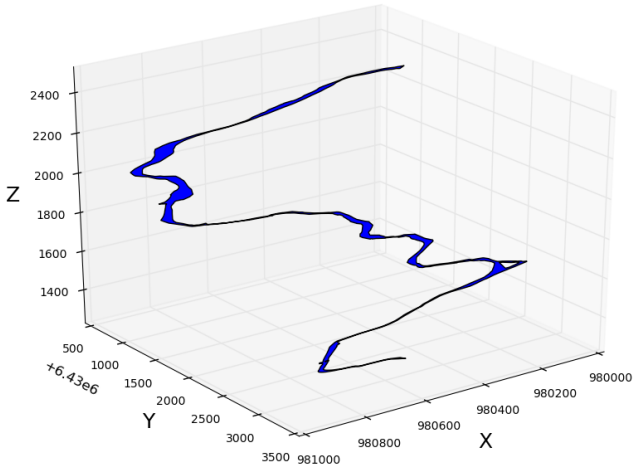
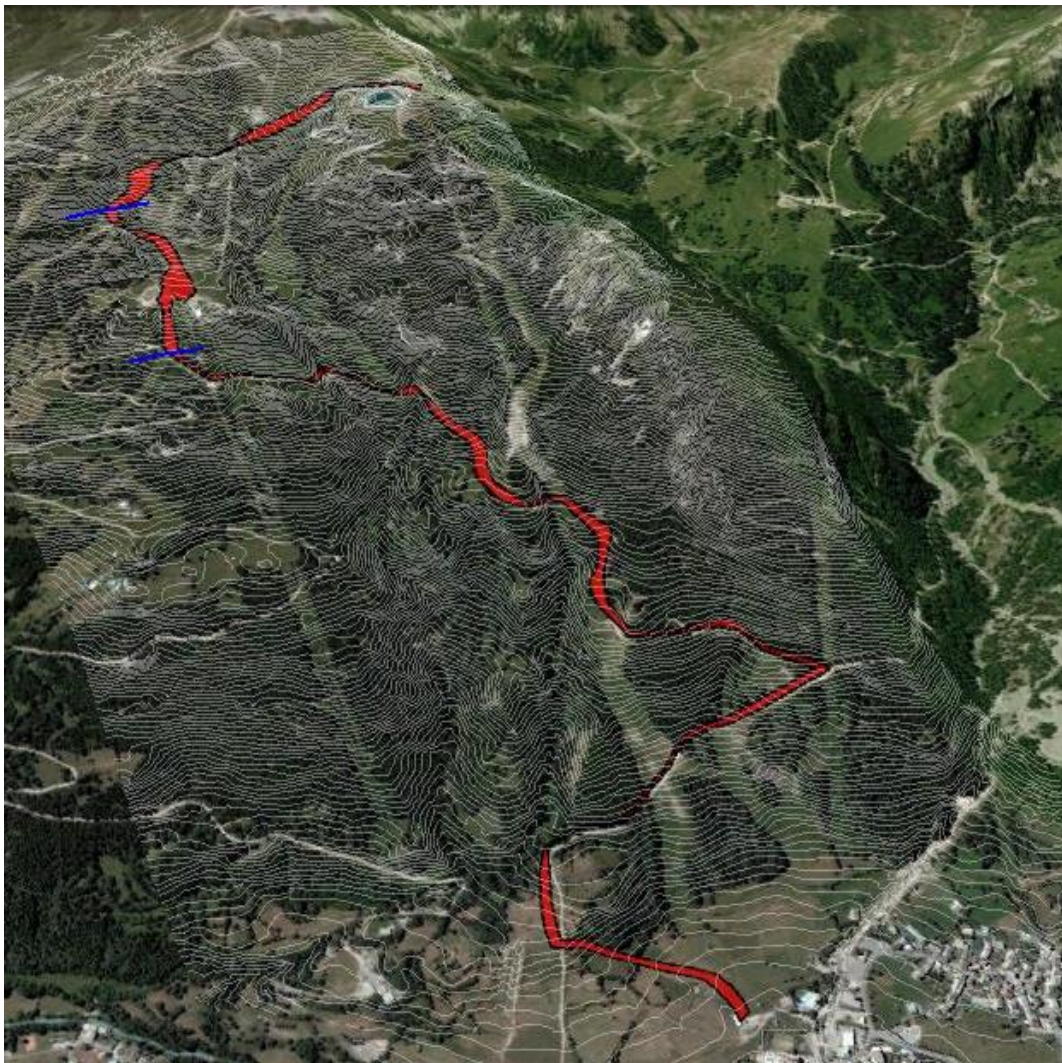
- Choix d'une piste de référence
- Identification de 4 saisons représentatives
- Estimation des besoins en consommation de neige par tronçon de piste
- Calcul du taux de fonte à partir du 1^{er} mars (avec quelle masse de neige résiste-t-on aux coups de chaud de fin de saison?)
- Adaptation de la production de neige de culture aux chutes de neige



LA ZONE D'ETUDE



LA ZONE D'ETUDE

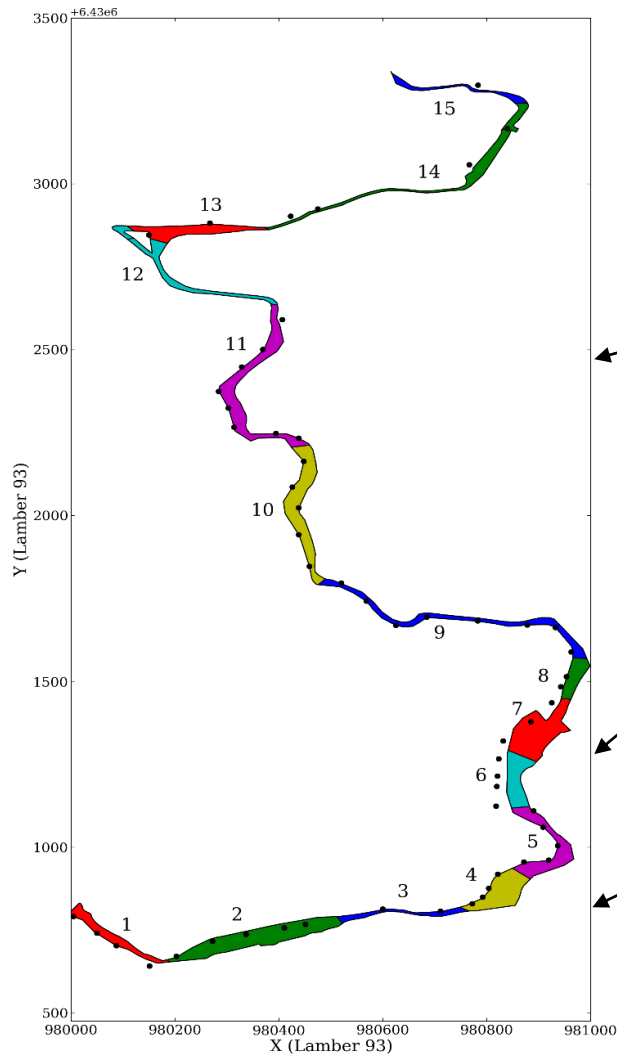


Caractéristique	Valeur
Haut	2270 m
Bas	1398 m
Dénivelé	872 m
Longueur	5245 m
Surface	11,2 ha
Pente moyenne	18% - 10°
Orientation moyenne	N

LA ZONE D'ETUDE



Serre Chevalier - Piste Marteau
15 tronçons



Découpage de la piste en tronçons

Marteau Bas :
Tronçons 9-15

Stade Aravet :
Tronçons 5-8

Marteau Haut :
Tronçons 1-4



LA ZONE D'ETUDE

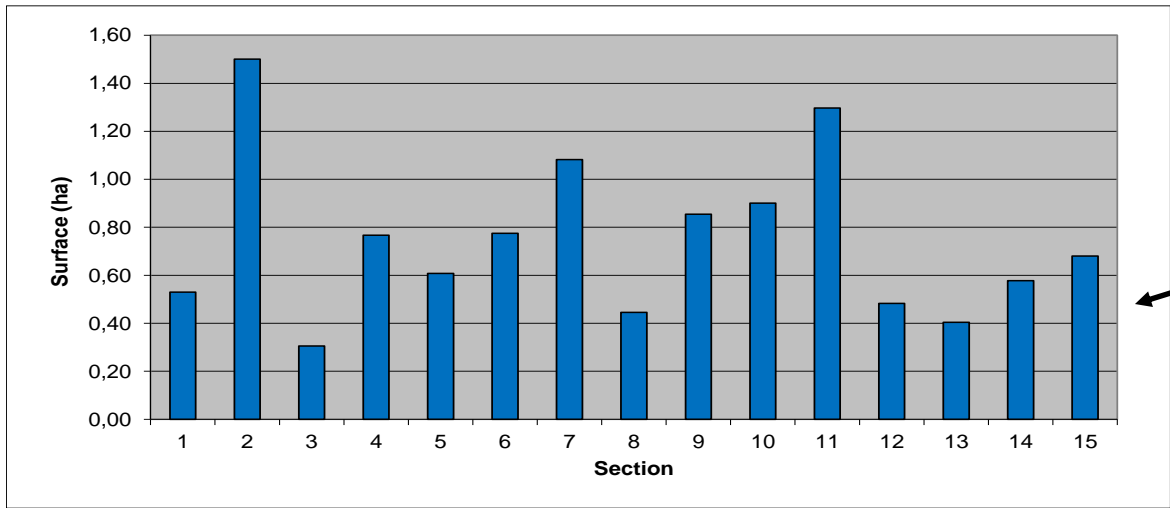
Caractéristiques des tronçons

Section	Zone	Haut (m asl)	Bas (m asl)	Altitude moyenne (m asl)	Longueur 2D (m)	Surface (m ²)	Pente (%)	Pente (°)	Surface 3D (m ²)	Orientation (0-360)
Marteau Haut	1	2 270	2 230	2 300	271	5 240	15%	8	5 296	80
	2	2 230	2 165	2 200	330	14 725	20%	11	15 008	70
	3	2 165	2 140	2 200	246	3 035	10%	6	3 050	80
	4	2 140	2 095	2 100	175	7 427	26%	14	7 669	20
Stade Aravet	5	2 095	2 040	2 100	207	5 871	27%	15	6 076	30
	6	2 040	1 990	2 000	218	7 555	23%	13	7 751	0
	7	1 990	1 970	2 000	169	10 743	12%	7	10 818	60
	8	1 970	1 930	1 900	168	4 331	24%	13	4 453	20
Marteau Bas	9	1 930	1 830	1 900	829	8 485	12%	7	8 547	300
	10	1 830	1 760	1 800	352	8 833	20%	11	9 006	0
	11	1 760	1 660	1 700	635	12 809	16%	9	12 967	0
	12	1 660	1 610	1 600	410	4 791	12%	7	4 826	350
	13	1 610	1 550	1 600	288	3 957	21%	12	4 042	80
	14	1 550	1 450	1 500	598	5 698	17%	9	5 777	50
	15	1 450	1 398	1 400	351	6 725	15%	9	6 800	300
Total					5 245	110 225			112 086	
Moyenne							18%	10		
Min							10%	6		
Max							27%	15		

~7,3% de la surface
couverte par le réseau
de neige de culture

~3% de la surface
totale des pistes

LA ZONE D'ETUDE

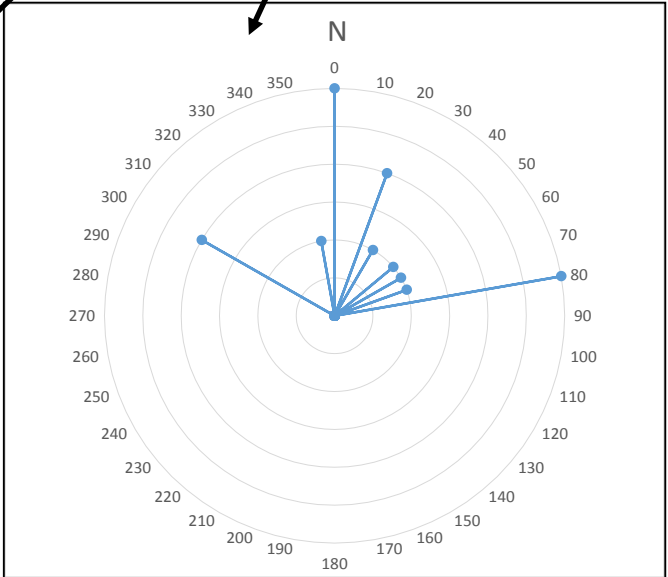
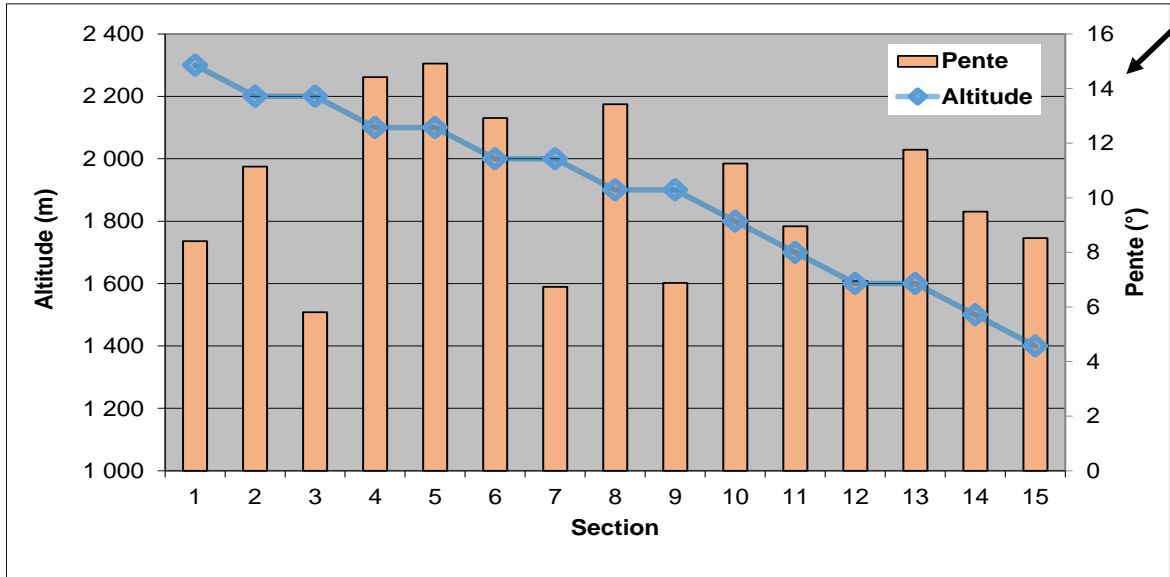


Caractéristiques des tronçons

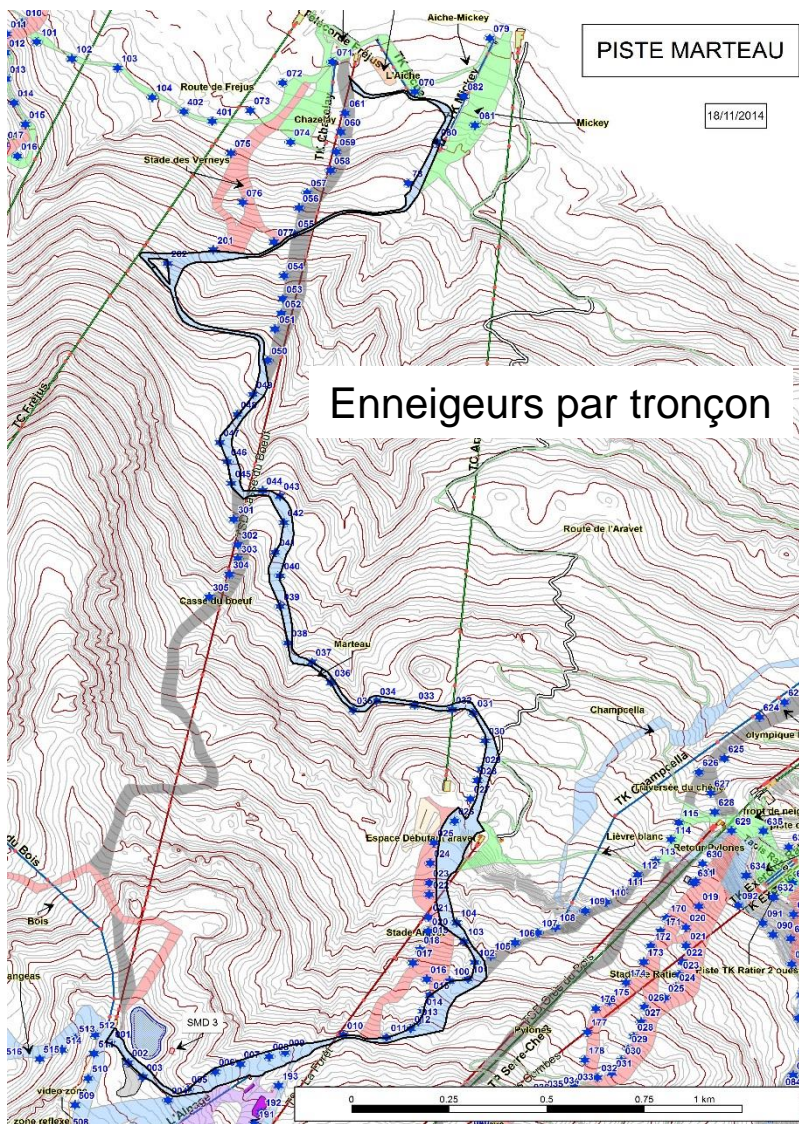
Surfaces

Altitudes et pentes

Orientations



LA ZONE D'ETUDE



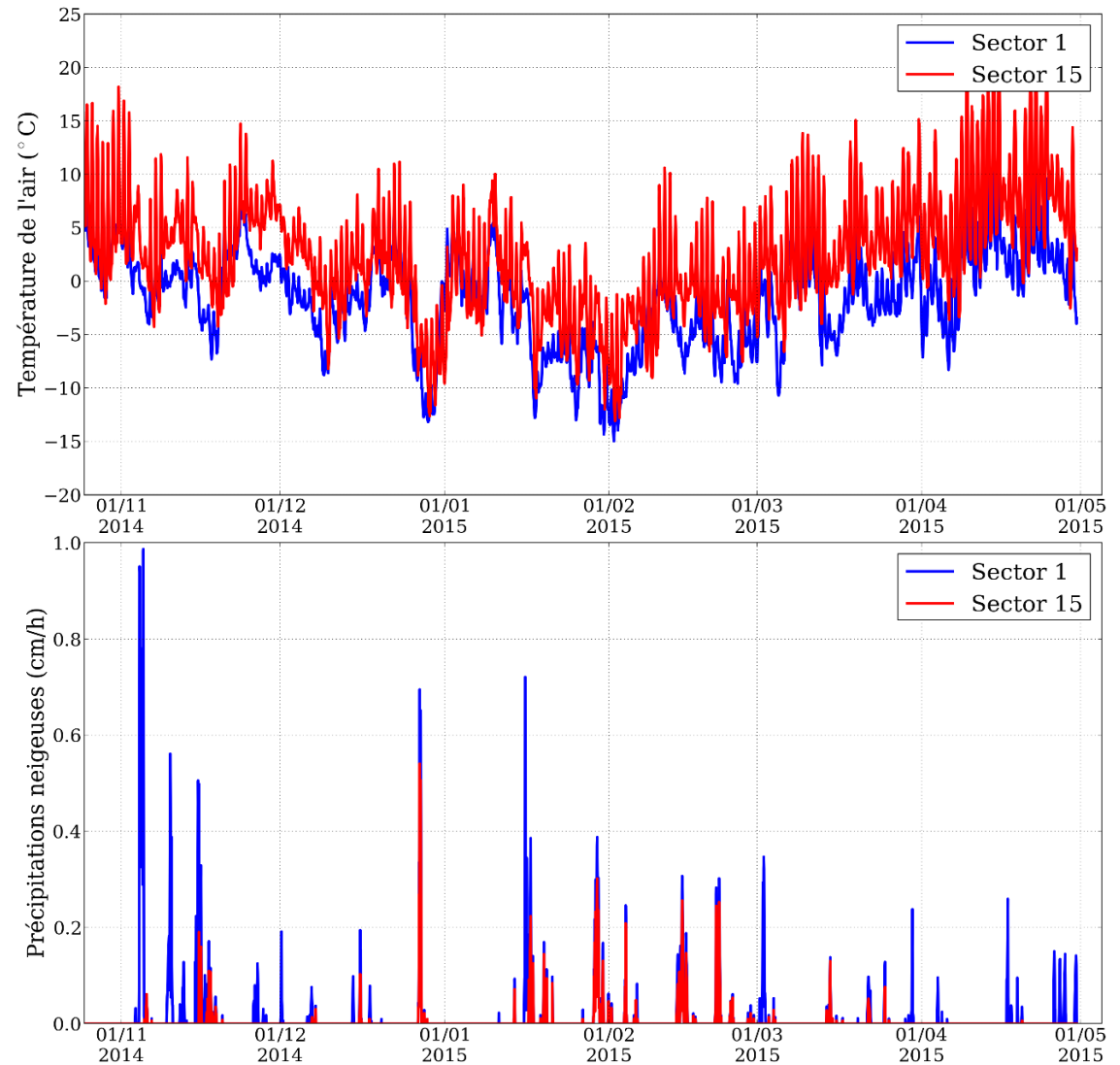
Numero enneigreur	X	Y	Z	Origine des données	Précision X-Y	Précision Z	Secteur
70	980783,1	6433298,3	1417,0	autre avant 2007			15
80	980840,0	6433166,3	1447,8	gps fev 2005	0,028	0,051	14
78	980766,5	6433057,3	1476,5	gps fev 2005	0,011	0,016	
55	980475,0	6432924,8	1525,4	gps sept 2008	0,534	1,366	
77	980423,1	6432902,6	1533,9	gps sept 2008	0,428	0,9	
201	980266,9	6432881,7	1563,3	gps fev 2005			13
202	980149,8	6432846,4	1601,9	gps fev 2005			11
50	980406,3	6432590,7	1661,7	gps sept 2008	0,329	0,797	
49	980369,0	6432500,7	1677,1	gps sept 2008	0,384	0,997	
48	980328,7	6432447,9	1691,0	gps sept 2008	0,383	1,155	
47	980284,1	6432374,0	1703,5	gps sept 2008	1,18	4,093	
46	980302,9	6432324,0	1723,0	gps sept 2008	0,677	1,311	
45	980313,6	6432266,2	1733,7	gps sept 2008	1,093	1,694	
44	980394,1	6432247,5	1747,1	gps sept 2008	0,553	1,128	
43	980438,4	6432233,3	1756,4	gps sept 2008	0,325	0,642	
42	980447,8	6432163,6	1762,0	gps sept 2008	0,016	0,022	
41	980425,7	6432085,7	1771,0	gps sept 2008	0,019	0,026	
40	980438,0	6432023,4	1787,3	gps sept 2008	0,536	0,744	
39	980438,2	6431942,3	1804,9	gps sept 2008	0,363	0,476	
38	980458,7	6431846,5	1824,9	gps sept 2008	0,348	0,421	
37	980519,9	6431796,3	1839,7	gps sept 2008	0,017	0,02	
36	980568,7	6431741,9	1854,4	gps sept 2008	0,506	0,571	
35	980625,4	6431669,0	1860,6	gps sept 2008	0,595	0,644	
34	980684,8	6431693,3	1868,5	gps sept 2008	0,388	0,402	
33	980782,8	6431682,4	1877,1	gps sept 2008	0,412	0,414	
32	980878,4	6431670,4	1891,4	gps sept 2008	0,372	0,375	
31	980932,7	6431662,2	1908,2	gps sept 2008	0,488	0,442	
30	980962,8	6431588,8	1925,3	gps sept 2008	0,017	0,014	
29	980953,5	6431513,6	1946,0	gps sept 2008	0,021	0,024	
28	980942,9	6431484,1	1957,2	gps sept 2008	0,028	0,033	
27	980925,3	6431435,2	1973,1	gps sept 2008	0,016	0,018	
26	980885,3	6431377,4	1980,7	gps sept 2008	0,423	0,467	
25	980832,0	6431320,2	1987,6	gps sept 2008	0,017	0,019	
24	980823,1	6431266,3	1993,3	gps sept 2008	0,023	0,032	
23	980820,6	6431214,4	2004,1	gps sept 2008	0,011	0,013	
22	980819,6	6431183,2	2014,0	gps sept 2008	0,307	0,376	
21	980818,1	6431123,8	2026,6	gps sept 2008	0,306	0,407	
104	980890,5	6431109,4	2034,2	gps fev 2005			5
103	980908,5	6431060,1	2046,3	gps fev 2005			
102	980936,8	6431004,6	2058,7	gps fev 2005			
101	980919,6	6430961,0	2078,5	gps fev 2005			
100	980871,8	6430955,5	2088,6	gps fev 2005			
15	980821,4	6430918,4	2104,7	gps sept 2008	0,009	0,018	
14	980804,1	6430875,7	2115,5	gps sept 2008	0,01	0,02	
13	980792,1	6430849,4	2126,5	gps sept 2008	0,314	0,66	
12	980772,2	6430829,7	2136,1	gps sept 2008	0,009	0,019	
11	980711,0	6430806,9	2145,7	gps sept 2008	0,415	1,239	
10	980599,9	6430813,2	2156,8	gps sept 2008	0,223	0,573	
9	980451,1	6430767,5	2178,1	gps fev 2005			3
8	980410,5	6430756,7	2185,1	gps fev 2005			
7	980336,7	6430736,9	2198,0	gps fev 2005			2
6	980272,3	6430716,6	2215,3	gps fev 2005			
5	980202,7	6430671,2	2228,1	gps fev 2005			
4	980151,3	6430641,8	2251,0	gps fev 2005			1
3	980087,4	6430702,5	2256,8	gps fev 2005			
2	980049,7	6430741,2	2264,3	gps oct 2011	0,01	0,02	
1	980004,8	6430790,9	2270,7	gps ete 2009	0,01	0,018	

LA METEO

SAFRAN

- Température de l'air
- Précipitations neigeuses

pour la **partie haute**
et la **partie basse** de la piste

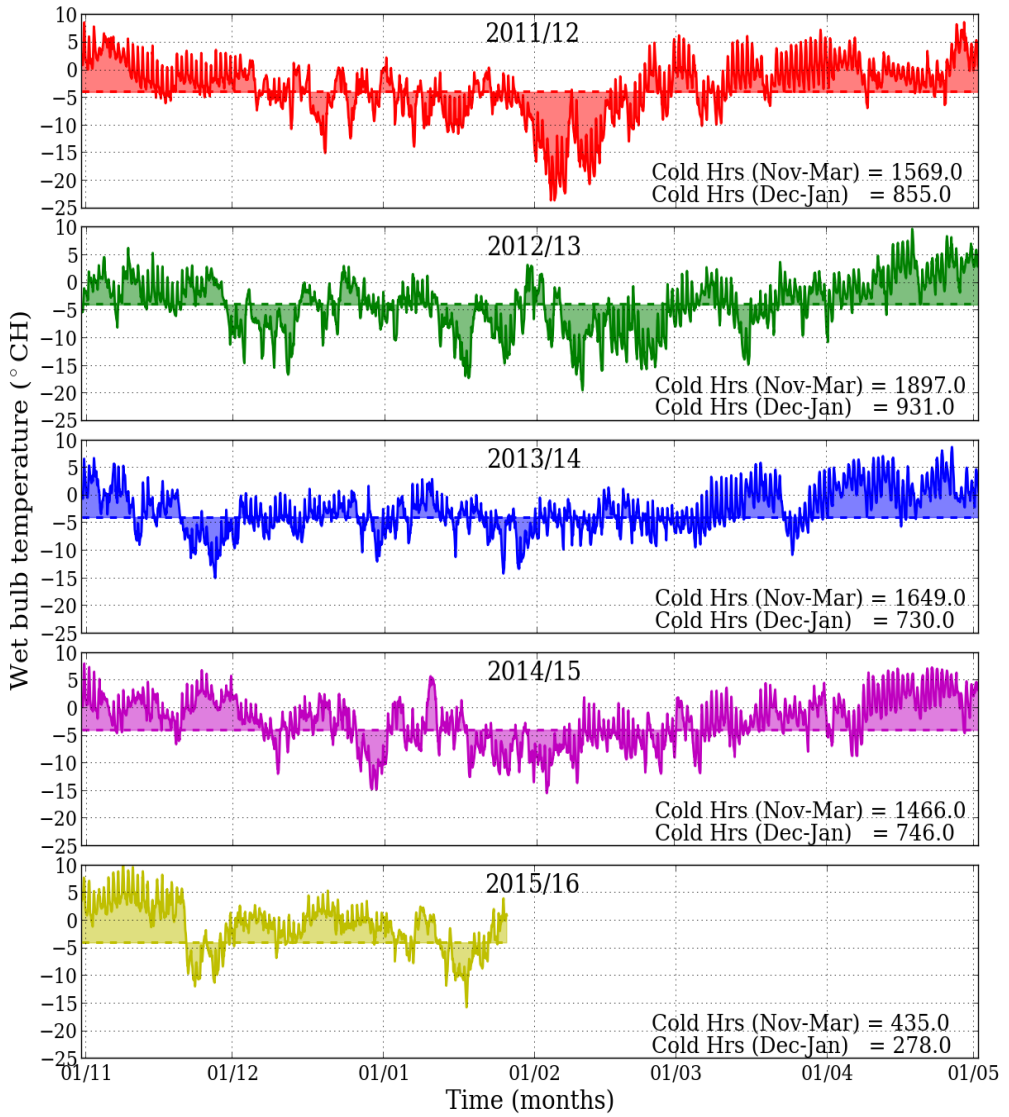


LA METEO

SAFRAN

- Température humide

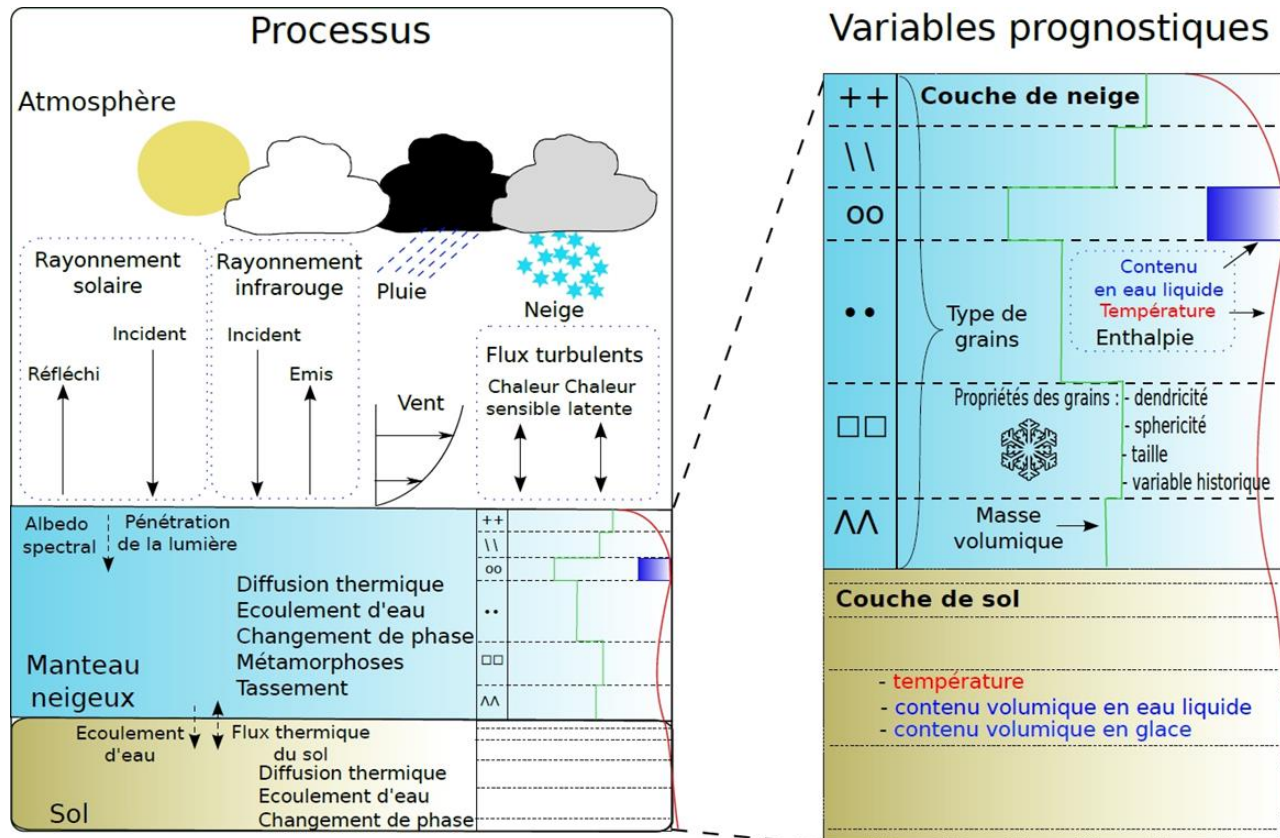
pour la partie haute de la piste
et différentes saisons



LE MANTEAU NEIGEUX

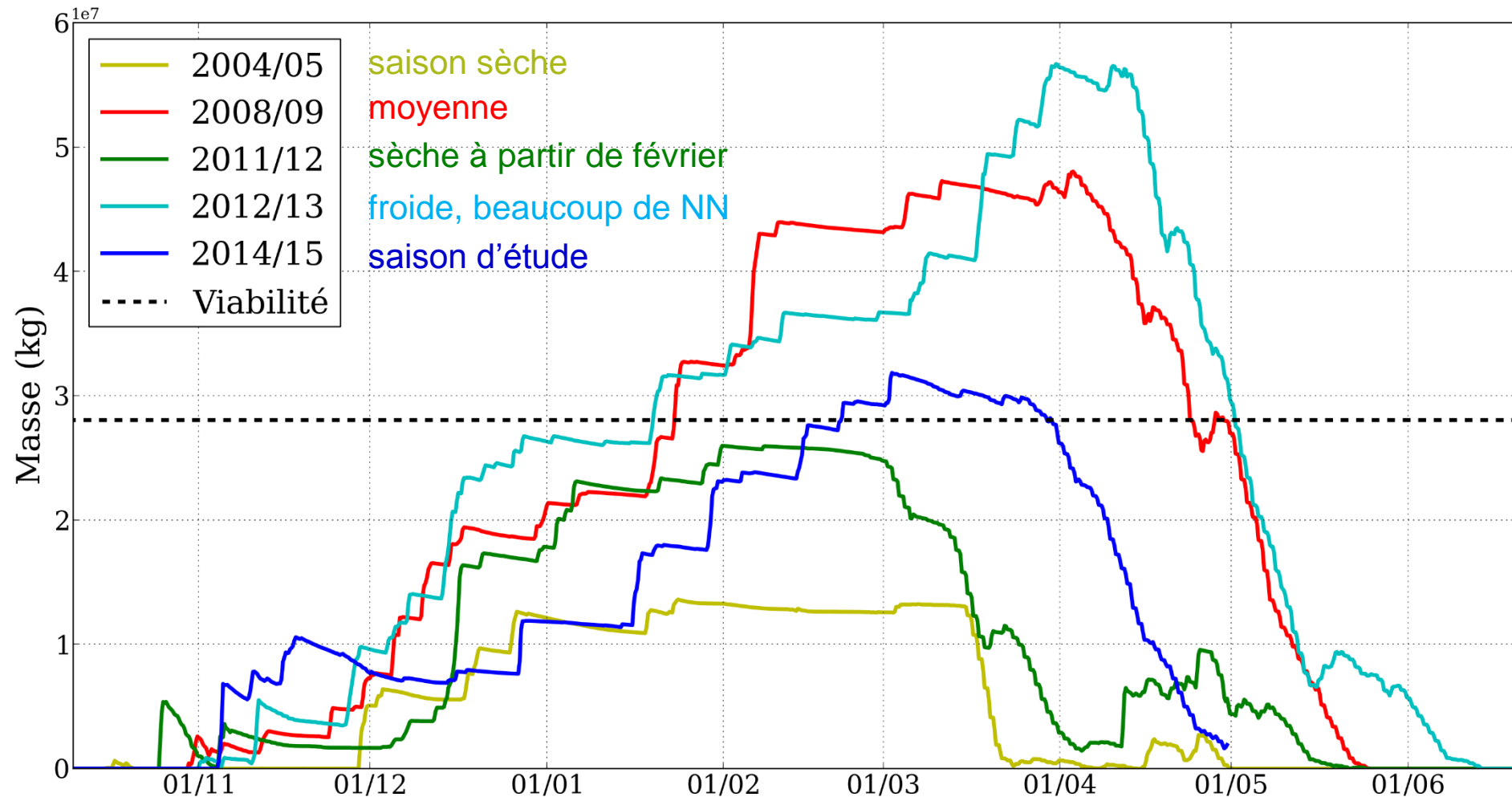
SURFEX/ISBA-Crocus

Sans le module Crocus-RESORT

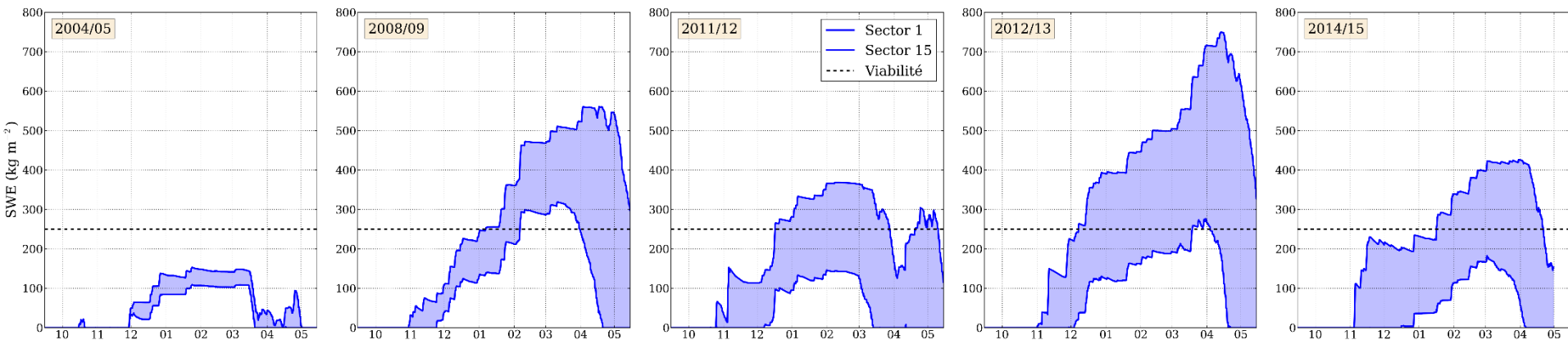


LE MANTEAU NEIGEUX

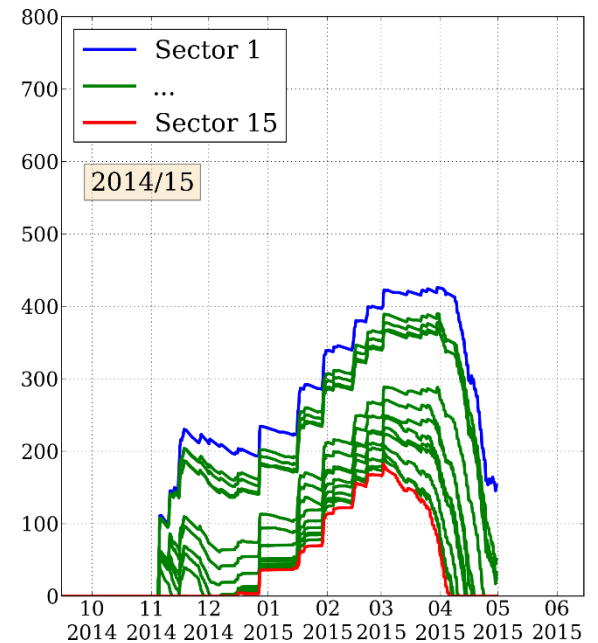
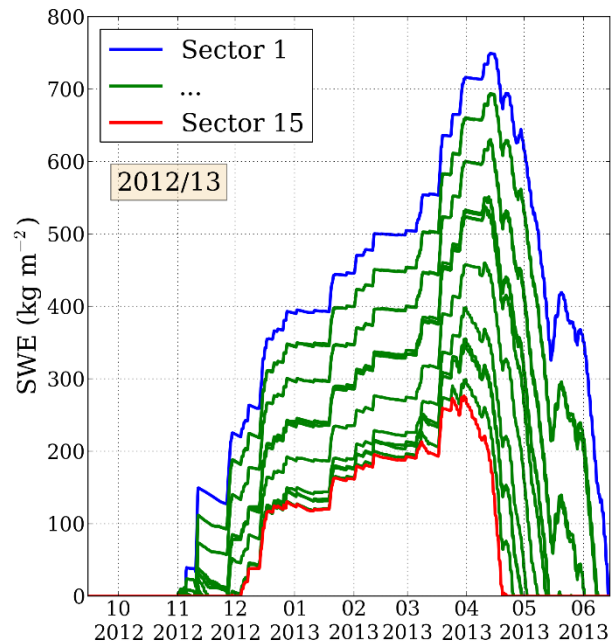
Masses de neige naturelle sur toute la piste Marteau



LE MANTEAU NEIGEUX

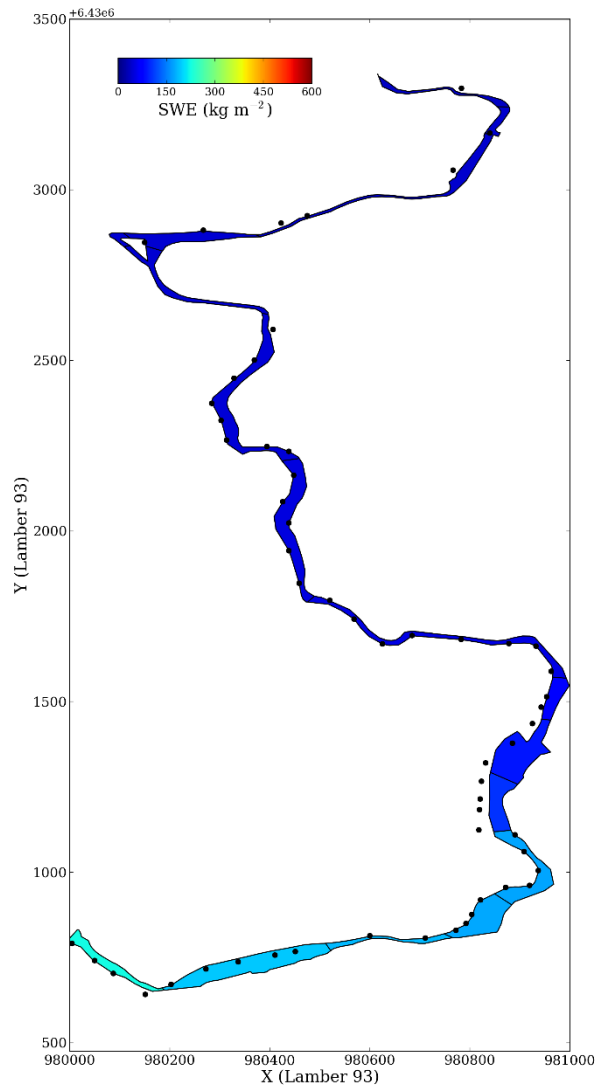


Evolution du SWE de la neige naturelle pour différentes saisons et différents tronçons de la piste

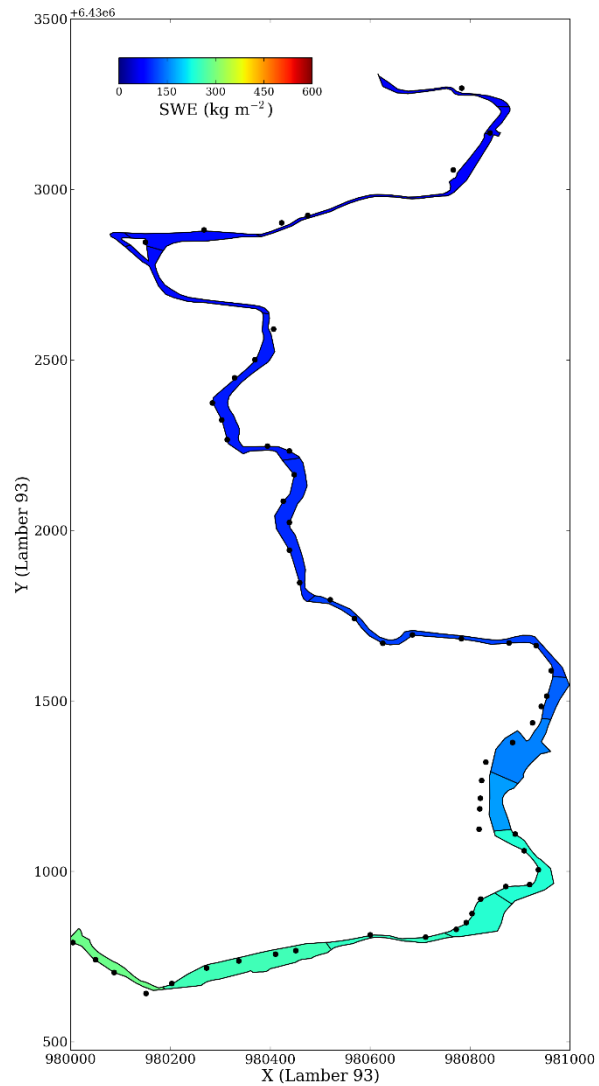


LE MANTEAU NEIGEUX

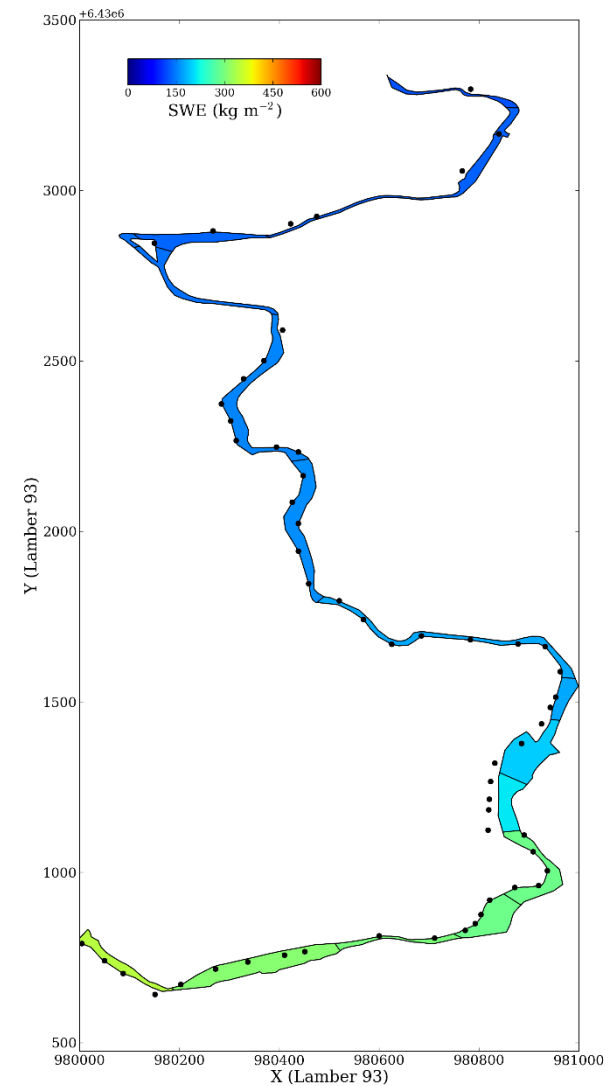
Serre Chevalier - Piste Marteau - 2015_01_14
Neige naturelle



Serre Chevalier - Piste Marteau - 2015_01_22
Neige naturelle

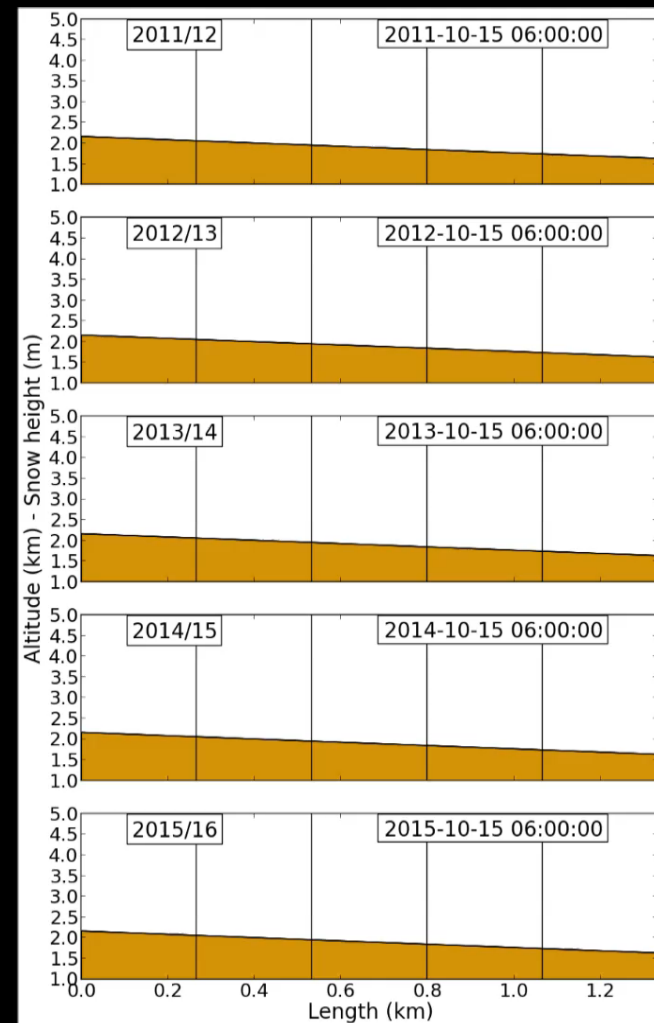
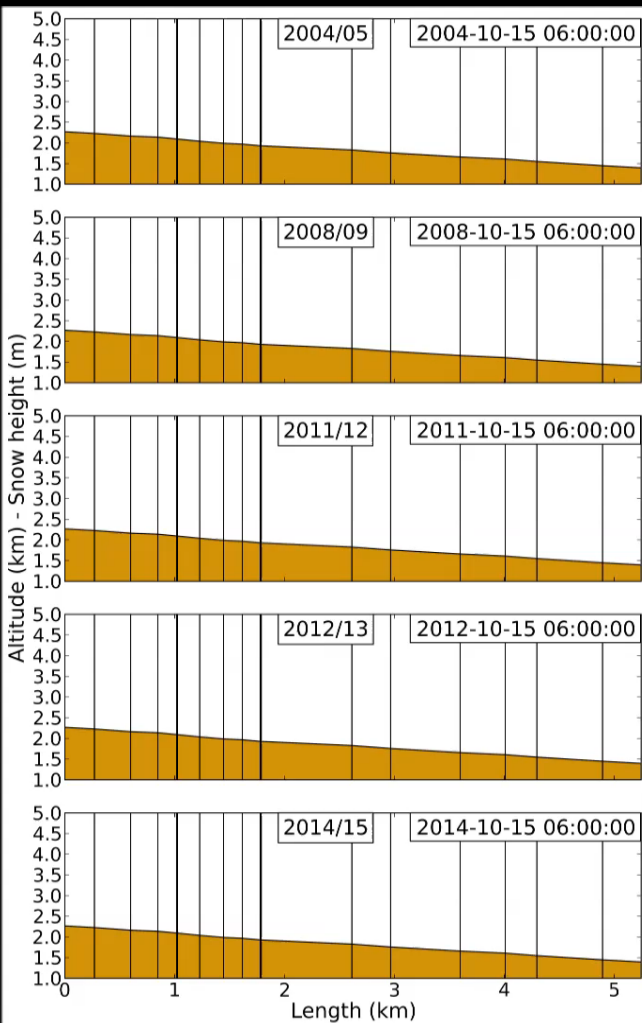


Serre Chevalier - Piste Marteau - 2015_02_16
Neige naturelle



Piste Marteau Serre-Chevalier

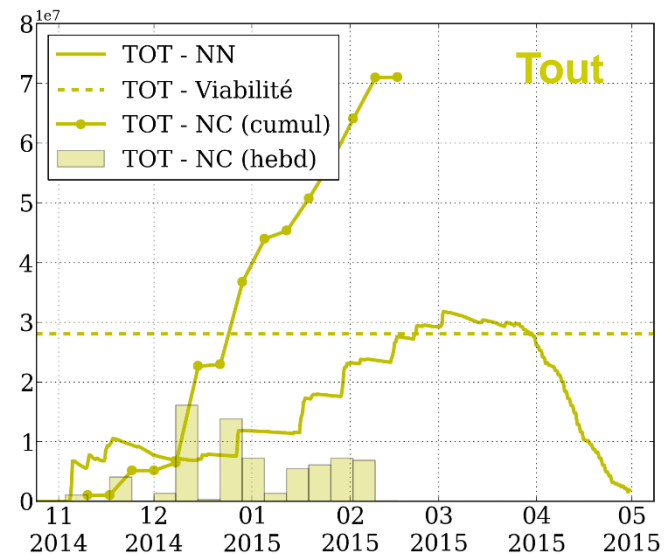
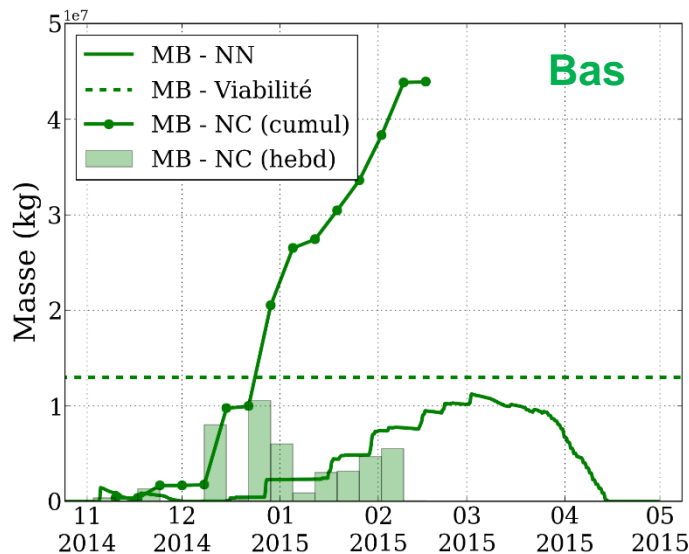
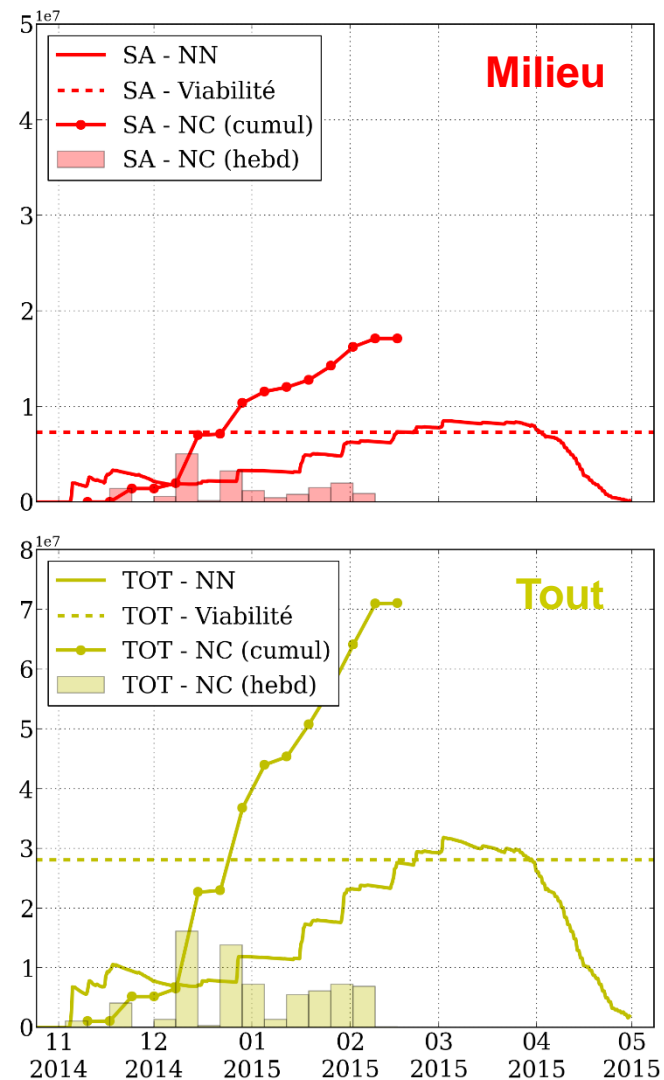
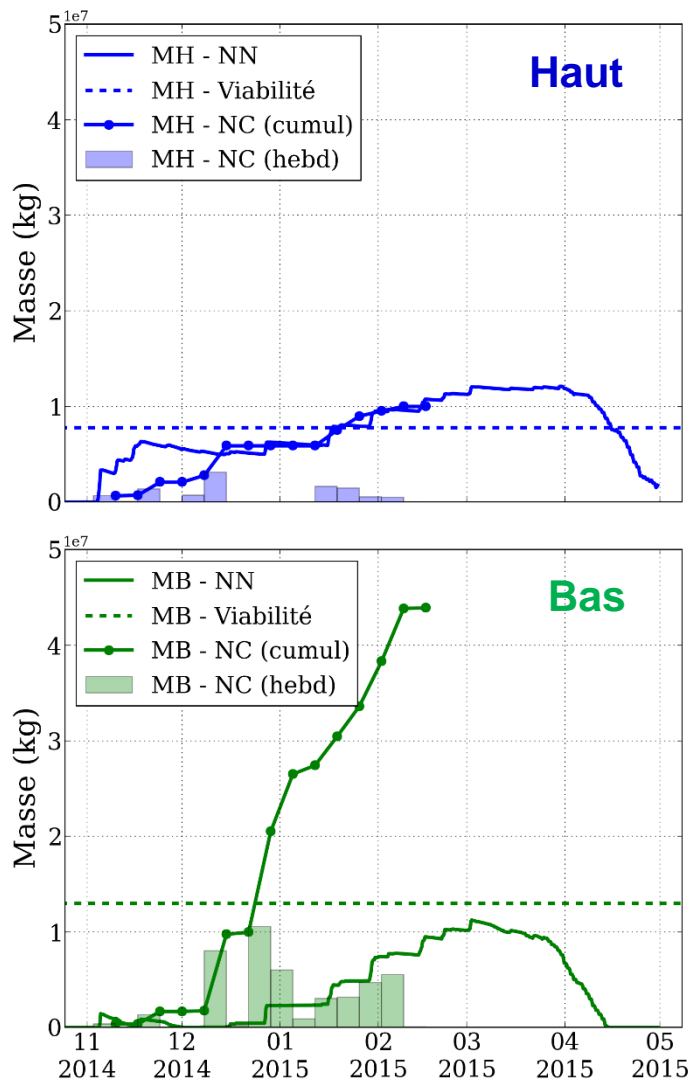
Piste Cachette Les Arcs



LA NEIGE DE CULTURE

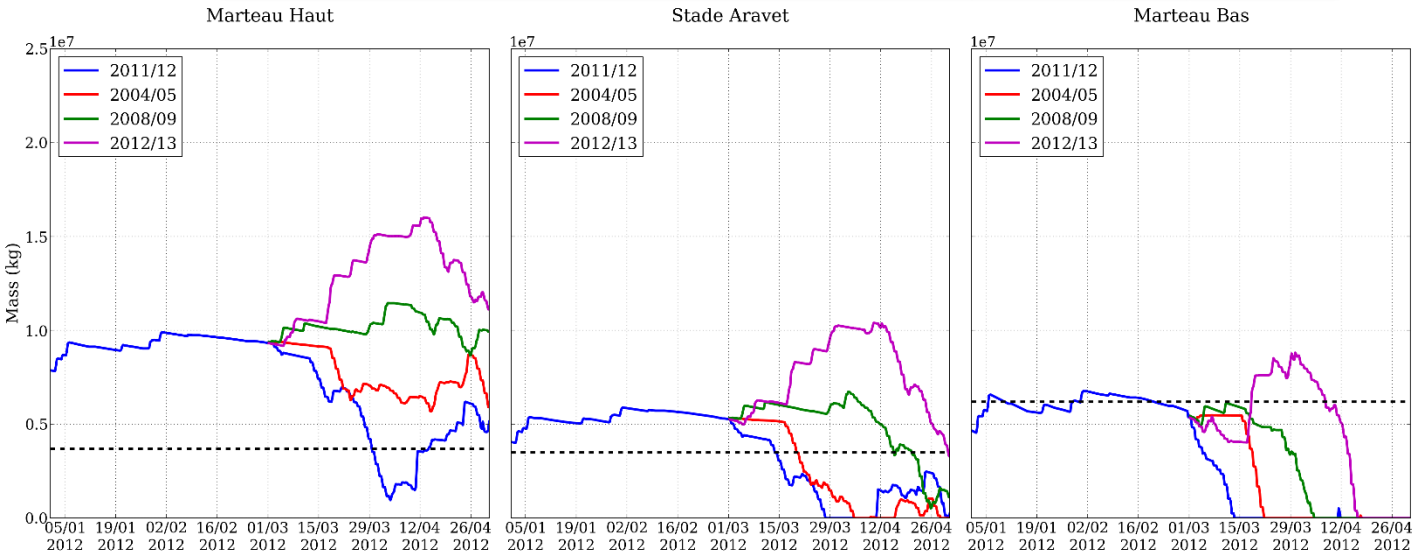
Comparaison entre :

- masses de NN
- masses de NC



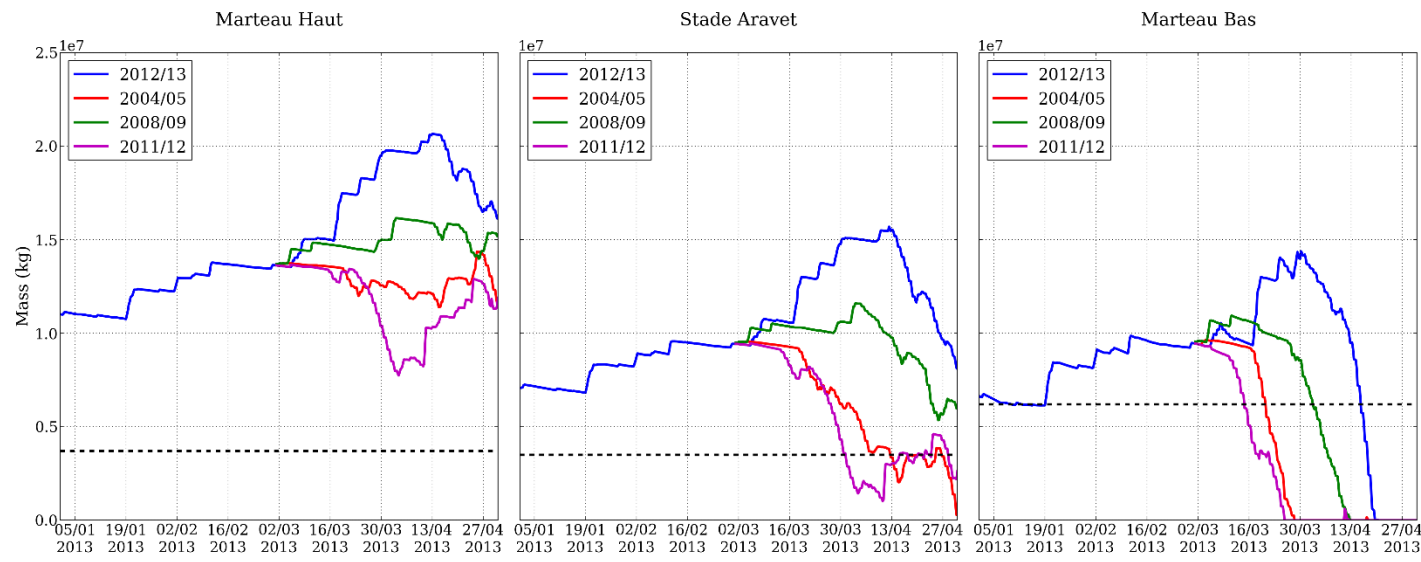
SIMULATIONS CROISEES

Evolution des masses de NN jusqu'au 1 mars pour une saison donnée



Ensuite, évolutions possibles pour des conditions météorologiques correspondant à des saisons différentes

Ces « simulations croisées » permettent de quantifier la variabilité saisonnière de la vitesse de fonte



ESTIMATION DES SEUILS

« OUVERTURE » - à partir du 1 décembre

Seuil pour la viabilité de la piste

$$\text{SWE (équivalent en eau)} = 0,5 \text{ m} \cdot 500 \text{ kg/m}^3 = 250 \text{ kg/m}^2$$



« FONTE » - à partir du 1 mars

Quantité de neige minimum qu'il faut avoir le 1 mars pour tenir jusqu'à la fin de la saison (30 avril)

- 1) Identification de la saison avec le minimum de SWE entre le 1 mars et le 30 avril (à partir des « simulations croisées »)
- 2) Simulation du manteau neigeux de cette saison, en initialisant le 1 mars avec :
$$\begin{cases} \rho_0 = 500 \text{ kg/m}^3 \\ h_i = \text{variable} \end{cases}$$
afin d'obtenir une hauteur $>0,5 \text{ m}$ et un $\text{SWE} > 250 \text{ kg/m}^2$ entre le 1 mars et le 30 avril
- 3) Calcul du $\text{SWE}_0 = \rho_0 \cdot \min(h_i)$ au 1 mars
$$\begin{cases} \text{MH} : 425 \text{ kg/m}^2 \\ \text{SA} : 500 \text{ kg/m}^2 \\ \text{MB} : 575 \text{ kg/m}^2 \end{cases}$$

COURBE DE PRODUCTION

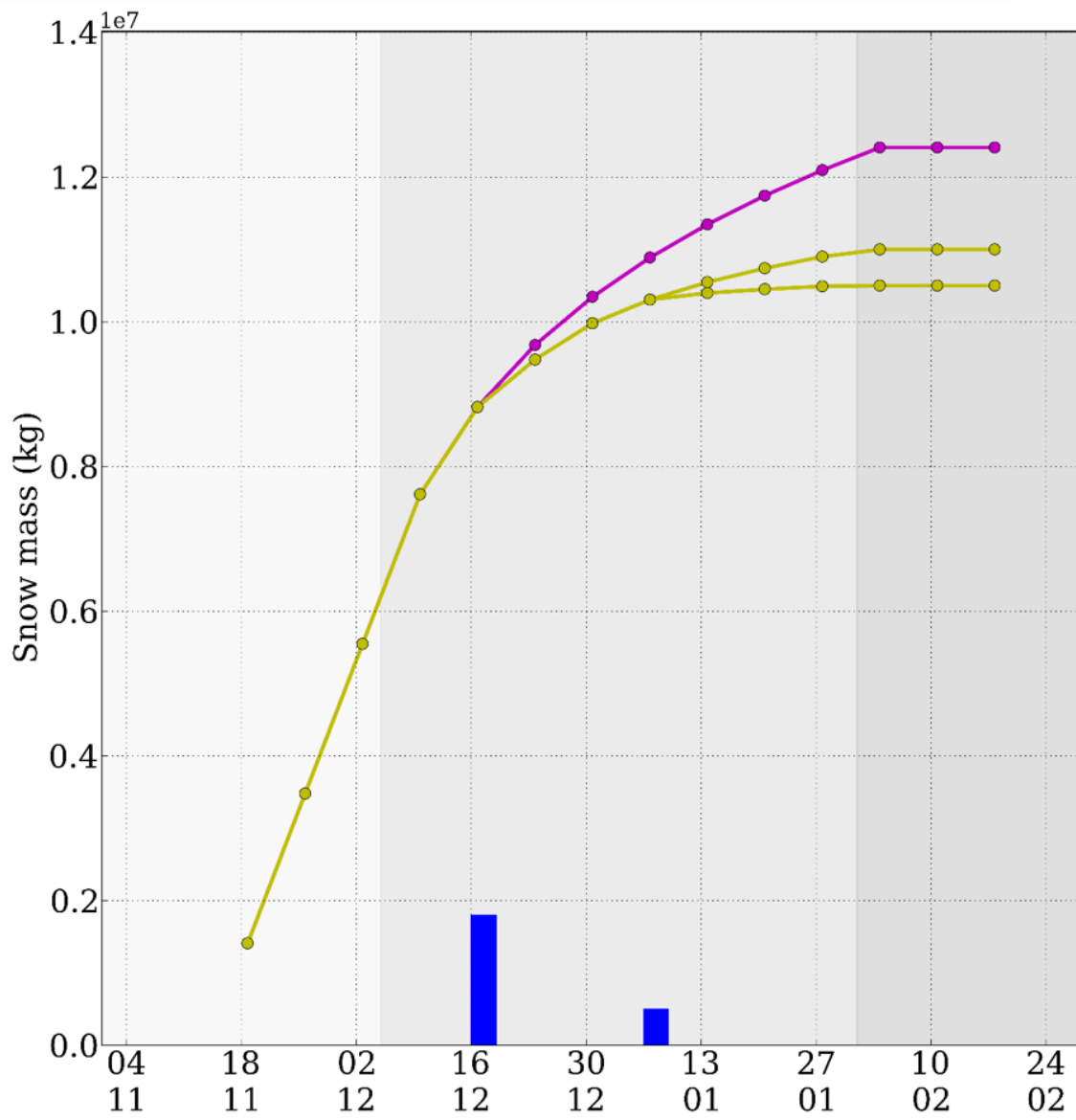
Trois périodes

Production optimum
sans prendre en compte la NN



Chute de neige

Production optimum «adaptée»
avec prise en compte de la NN

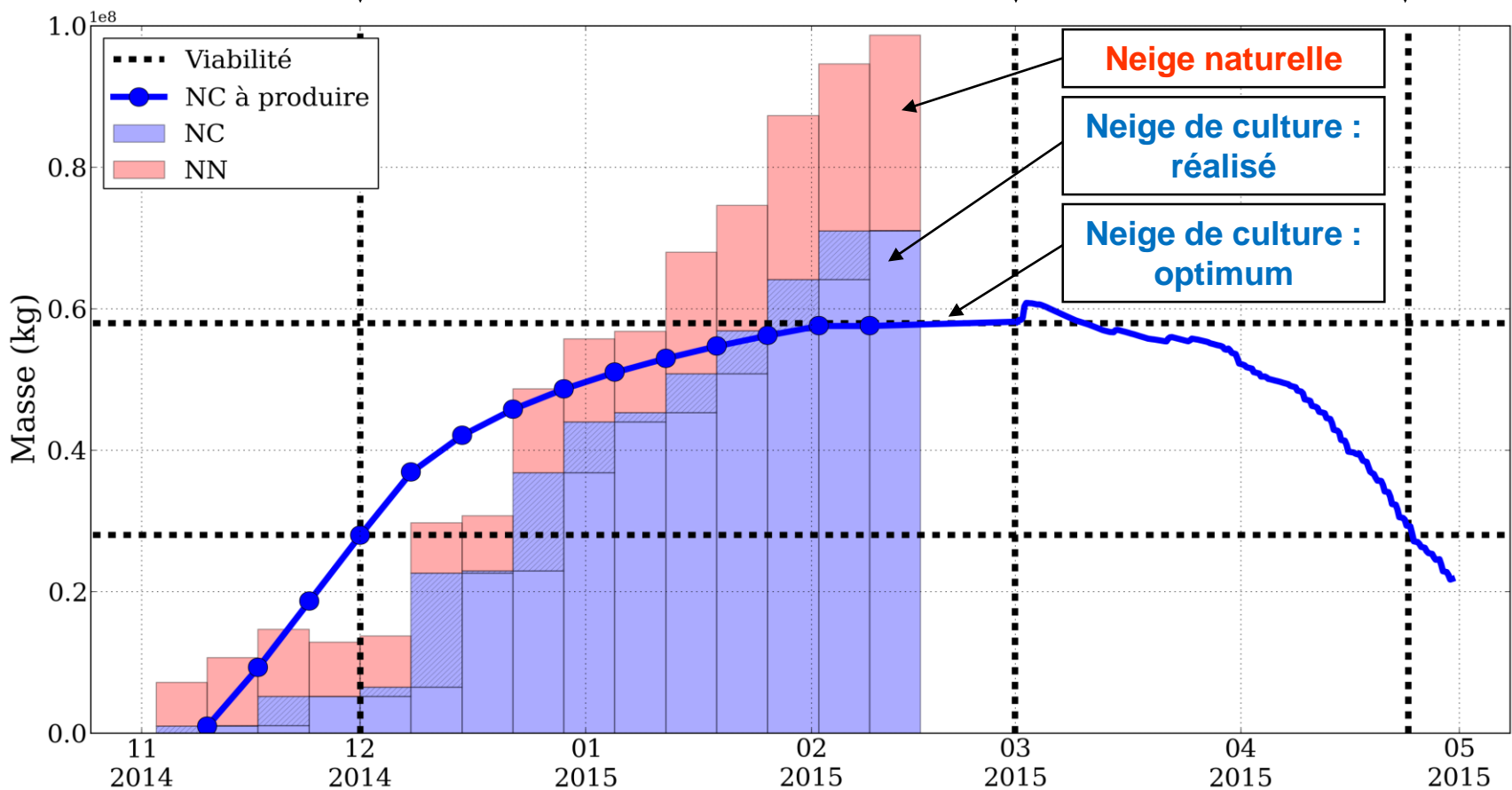


OPTIMISATION DE LA PROD

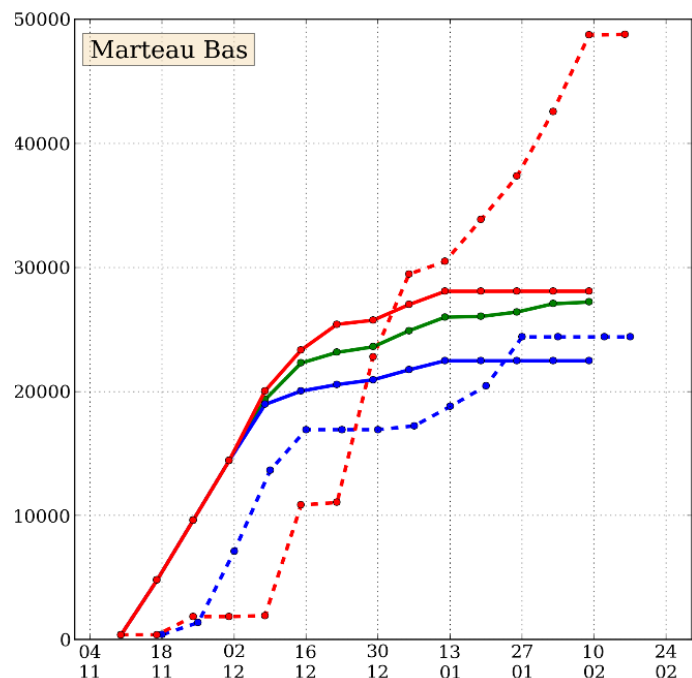
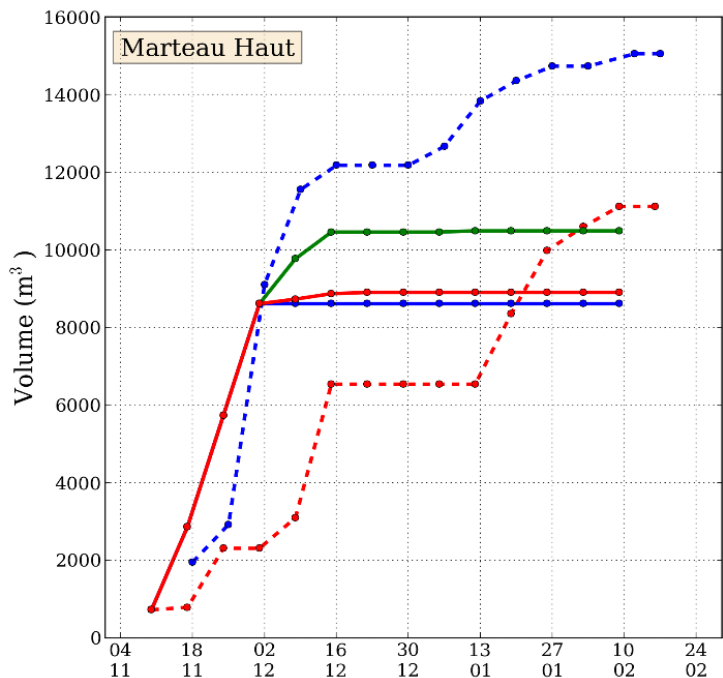
1 décembre : masse mini pour que la piste soit ouverte

1 mars : masse mini pour que la piste tienne jusqu'à fin saison

25 avril : fermeture

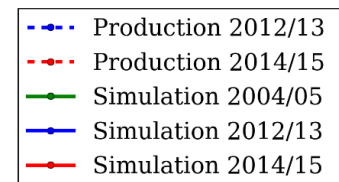


OPTIMISATION DE LA PROD



Volumes d'eau :

- Production réelle (tiré)
- Production optimum simulée (solide)



Production réelle supérieure à celle optimum simulée

2004/05: saison sèche

2012/13: saison arrosée

2014/15: proche de 2012/13 sur le haut
proche de 2004/05 sur le bas

LIMITES ET PERSPECTIVES

Limites principales de la méthode :

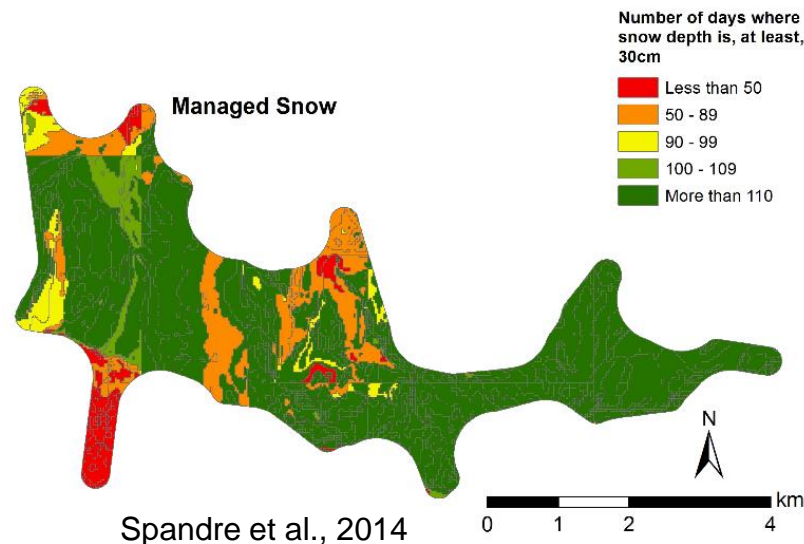
- Hypothèse que toutes les masses de neige (naturelle et de culture) qui tombent sur la piste jusqu'au 1 mars restent sur l'assiette de la piste (pas de fonte, pas de sublimation, pas d'érosion, etc.)
- Piste "lisse", ie on ne prend pas en compte les m³ de neige nécessaires pour combler les irrégularités de la piste



LIMITES ET PERSPECTIVES

Axes d'amélioration :

- Faire évoluer l'algorithme d'optimisation de la production de NC
Météo-France: **Crocus-RESORT**
- Estimer le taux de fonte sur chaque tronçon de piste dans un domaine skiable entier
IRSTEA : **spatialisation**





ANNEXE : FLUX DES SKIEURS



Système **Skiflux**

Comptage des skieurs par coupure d'un barrage infrarouge

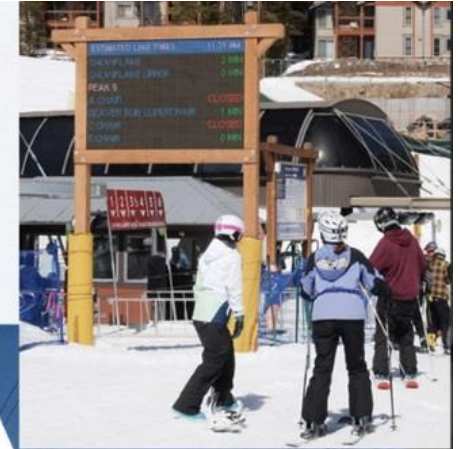
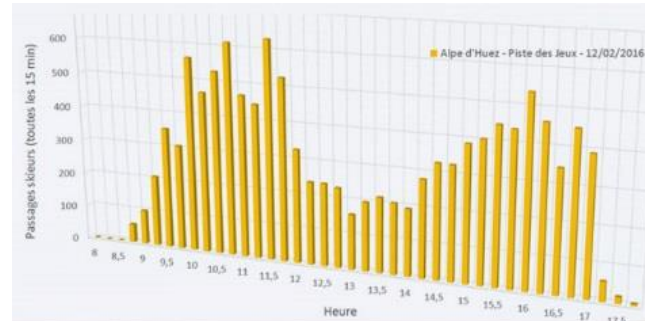
- 1 - Temps réel : Optimisation des flux sur le domaine
- 2 - Court terme : Optimisation de la préparation des pistes
- 3 - Moyen et long termes : Amélioration de l'organisation globale des domaines skiables

Snow design





ANNEXE : FLUX DES SKIEURS



Mesures sur la piste des Jeux
Alpe d'Huez (février 2016)



QUESTIONS ?

