



HAL
open science

Les progrès en sélection génomique chez les arbres forestiers

Leopoldo Sanchez

► **To cite this version:**

Leopoldo Sanchez. Les progrès en sélection génomique chez les arbres forestiers. Accélération des programmes d'amélioration des plantes grâce à la génomique, Séance publique Académie d'Agriculture de France, Jan 2022, Paris, France. hal-03601505

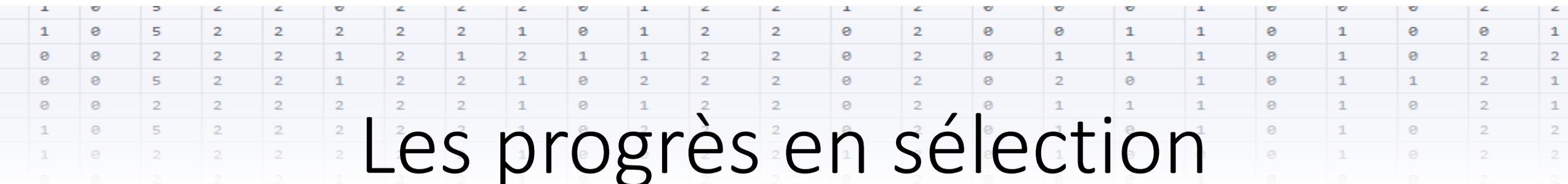
HAL Id: hal-03601505

<https://hal.inrae.fr/hal-03601505>

Submitted on 8 Mar 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Les progrès en sélection génomique chez les arbres forestiers

Leopoldo Sanchez

UMR INRAE - ONF BioForA

Biologie intégrée pour la valorisation de la diversité des arbres et de la forêt

Centre Val de Loire (Orléans)

Séance publique Académie d'Agriculture de France

Accélération des programmes d'amélioration des plantes grâce à la génomique

19/01/2022



Une alternative de rupture

Sélection génomique :

Une technologie de rupture pour révolutionner les performances de la prédiction phénotypique

- Apporter une précision compétitive à une sélection très précoce
- Dissocier l'évaluation génétique du phénotypage (à différents moments, sur différents individus)
- Utilisez la puissance de milliers de marqueurs, au lieu des pedigrees (souvent) peu fiables (*)

Réalité disruptive (bénéfique) pour le bovins, et sur un nombre croissant d'autres animaux d'élevage et de cultures

Arbres forestiers utilisés pour l'amélioration :

L'un des taxa en cours de domestication pour lequel la GS pourrait apporter les avantages les plus remarquables, compte tenu de la longueur des cycles, du phénotypage coûteux et lourd, des nouvelles demandes urgentes ...



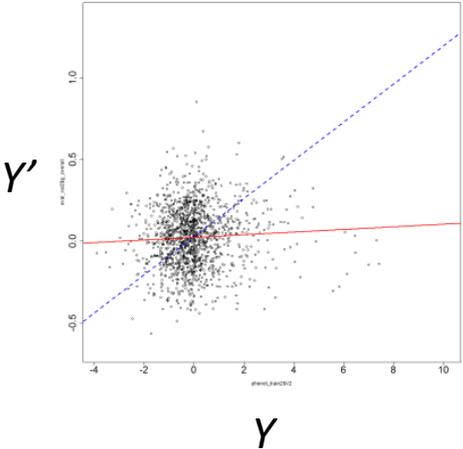
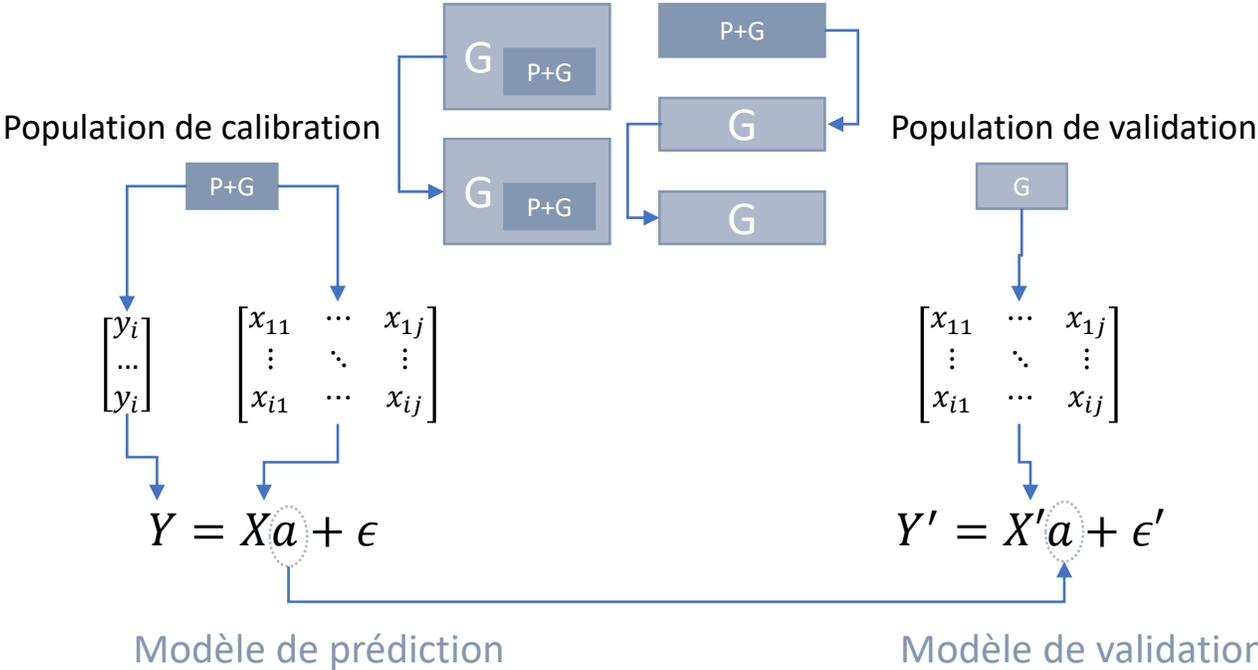
DNA microarray



Share genes : share phenotypes

Principe de la sélection génomique

Principe : basé sur les liens détectés entre génotypes et phénotypes



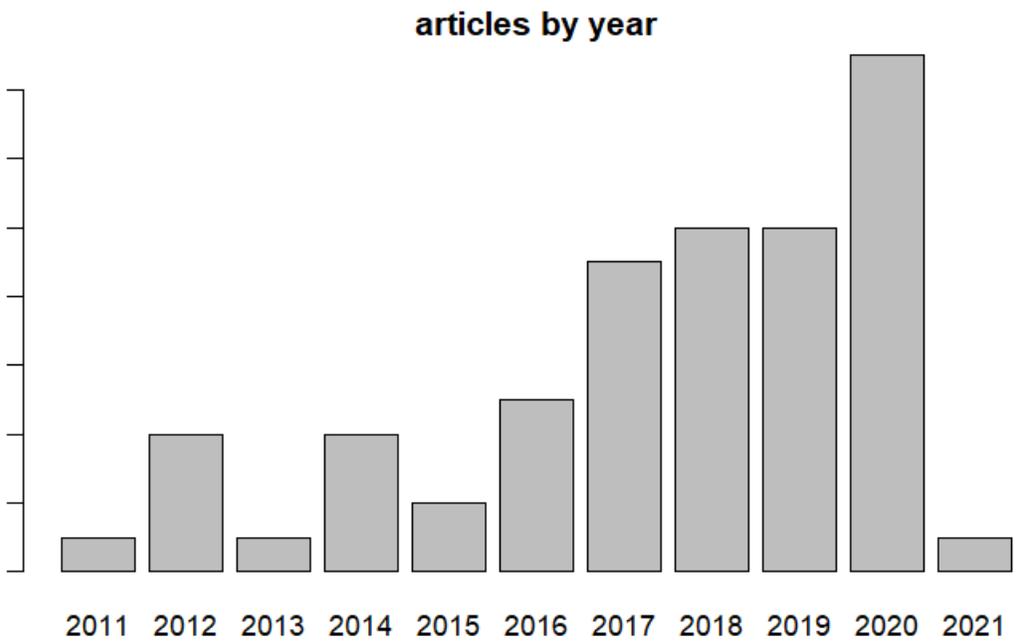
$\Delta G = i r \sigma A / L$

améliorateur $\rightarrow i, r, L$
 trade-offs $\rightarrow r \ll L$
 maximizer $r/L [i]$, intégrer plus rapidement des informations (plus) précises \rightarrow GS

Species	Conifer/broadleaf	Markers	Individuals	Trait typology	Reference	Year
Castanea dentata	broadleaf	71507	1230	Disease	Westbrook et al 2020	2020
Cryptomeria japonica	conifer	32036	476	Growth & WQ	Hiraoka et al 2018	2018
Eucalyptus cladocalyx	broadleaf	3800	1470	Growth & WQ	Ballesta et al 2020	2020
Eucalyptus globulus	broadleaf	14442	646	Growth & Branch	Ballesta et al 2018	2018
Eucalyptus globulus	broadleaf	14442	646	Growth & WQ	Ballesta et al 2019	2019
Eucalyptus globulus	broadleaf	30000	3000	Growth & WQ	Wang et al 2017	2017
Eucalyptus grandis	broadleaf	2836	2836	Growth	Cappa et al 2017	2017
Eucalyptus grandis	broadleaf	2816	187	Growth	Cappa et al 2018	2018
Eucalyptus grandis	broadleaf	15040	1548	Growth & WQ	Mphahlele et al 2020	2020
Eucalyptus hybrids	broadleaf	3303	1130	Growth	Bouvet et al 2016	2016
Eucalyptus hybrids	broadleaf	3303	1130	Growth & WQ	Bouvet et al 2020	2020
Eucalyptus hybrids	broadleaf	33398	999	Biochem & WQ	Cappa et al 2019	2019
Eucalyptus hybrids	broadleaf	40932	995	Growth & WQ	De Moraes et al 2018	2018
Eucalyptus hybrids	broadleaf	3129	275	Growth & WQ	Grattapaglia et al 2011	2011
Eucalyptus hybrids	broadleaf	20090	822	Growth & WQ	Lima 2014	2014
Eucalyptus hybrids	broadleaf	19506	732	Growth	Müller et al 2017	2017
Eucalyptus hybrids	broadleaf	3129	275	Growth & WQ	Resende et al 2012a	2012
Eucalyptus hybrids	broadleaf	24806	768	Growth & WQ	Resende et al 2017b	2017
Eucalyptus hybrids	broadleaf	41304	958	Growth & WQ	Tan et al 2017	2017
Eucalyptus hybrids	broadleaf	41304	958	Growth & WQ	Tan et al 2018	2018
Eucalyptus nitens	broadleaf	12236	691	Growth & WQ	Suontama et al 2018	2018
Eucalyptus nitens	broadleaf	12236	691	Growth & WQ	Suontama et al 2019	2019
Eucalyptus pellita	broadleaf	2023	468	Growth & Pulp	Thavamanikumar et al 2020	2020
Eucalyptus polybractea	broadleaf	97000	480	Growth & Biochem	Kainer et al 2018	2018
Eucalyptus robusta	broadleaf	2919	415	Growth & WQ	Rambolarimanana et al 2018	2018
Fraxinus excelsior	broadleaf	50000	1250	Disease	Stocks et al 2019	2019
Hevea brasiliensis	broadleaf	107294	435	Growth	Souza et al 2019	2019
Picea abies	conifer	116765	1370	Growth & WQ	Chen et al 2018	2018
Picea abies	conifer	116765	1370	WQ	Chen et al 2019	2019
Picea abies	conifer	5660	726	WQ	Lenz et al 2020	2020
Picea abies	conifer	5660	726	Growth & WQ & dise	Lenz et al 2020a	2020
Picea abies	conifer	130269	484	Growth & WQ	Zhou et al 2020	2020
Picea glauca	conifer	6932	1748	Growth & WQ	Beaulieu et al 2014a	2014
Picea glauca	conifer	6932	1694	Growth & WQ	Beaulieu et al 2014b	2014
Picea glauca	conifer	4148	1516	Growth & WQ & dise	Beaulieu et al 2020	2020
Picea glauca	conifer	4092	2405	Growth & WQ	Lenz et al 2020b	2020
Picea glauca	conifer	6932	1694	Growth & WQ	Ratcliffe et al 2017	2017
Picea hybrids	conifer	62198	1126	Growth & WQ	El-Dien et al 2015	2015
Picea hybrids	conifer	7338	1694	Growth & WQ	El-Dien et al 2016	2016
Picea hybrids	conifer	30000	1126	Growth & WQ	El-Dien et al 2018	2018
Picea hybrids	conifer	50803	769	Growth & WQ	Ratcliffe et al 2015	2015
Picea mariana	conifer	4993	734	Growth & WQ	Lenz et al 2017	2017
Picea sitchensis	conifer	56000	498	Growth & Pheno	Fuentes-Utrilla et al 2017	2017
Pinus contorta	conifer	19584	1569	Growth & WQ	Ukrainetz and Mansfield 2020	2020
Pinus pinaster	conifer	4332	818	Growth & form	Bartholome et al 2016	2016
Pinus pinaster	conifer	2500	661	Growth & form	Isik et al 2016	2016
Pinus radiata	conifer	67168	1103	Branching	Li et al 2019	2019
Pinus sylvestris	conifer	8719	694	Growth & WQ	Calleja-Rodriguez et al 2019	2019
Pinus taeda	conifer	7216	923	Growth & WQ & dise	De Almeida et al 2016	2016
Pinus taeda	conifer	4852	951	Growth & WQ & dise	Munoz et al 2014	2014
Pinus taeda	conifer	4852	951	Growth & WQ & dise	Resende et al 2012b	2012
Pinus taeda	conifer	4852	926	Growth & WQ & dise	Resende et al 2012c	2012
Pinus taeda	conifer	3461	149	Growth & WQ	Zapata-Valenzuela et al 2012	2012
Pinus taeda	conifer	3461	165	Growth & WQ	Zapata-Valenzuela et al 2013	2013
Populus deltoides	broadleaf	92000	473	Growth	Alves et al 2020	2020
Populus nigra	broadleaf	34000	241	Growth & Pheno & di	Chateigner et al 2020	2020
Populus nigra	broadleaf	7000	1011	Growth & Pheno & di	Pegard et al 2020	2020
Populus nigra	broadleaf	428836	241	Growth & Pheno & di	Wade et al 2021	2021
Pseudotsuga menziesii	conifer	66969	13615	Growth	Ratcliffe et al 2019	2019
Pseudotsuga menziesii	conifer	69551	1372	Growth & WQ	Thistlethwaite et al 2017	2017
Pseudotsuga menziesii	conifer	69551	1321	Growth & WQ	Thistlethwaite et al 2019a	2019
Pseudotsuga menziesii	conifer	56454	1321	Growth & WQ	Thistlethwaite et al 2020a	2020

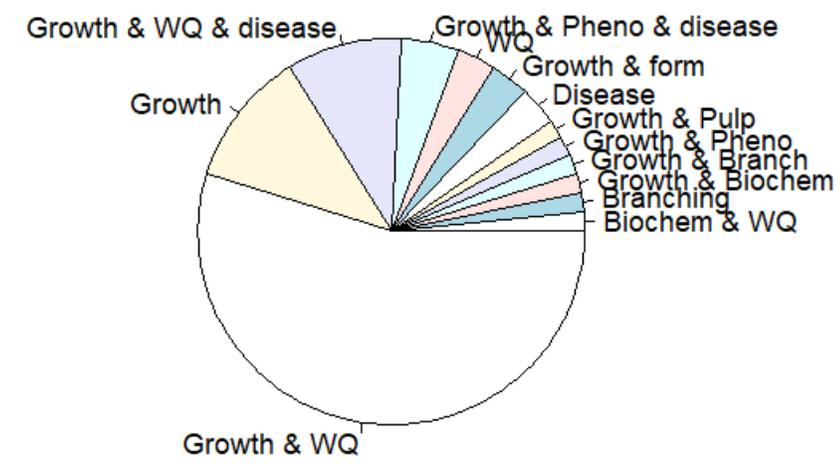
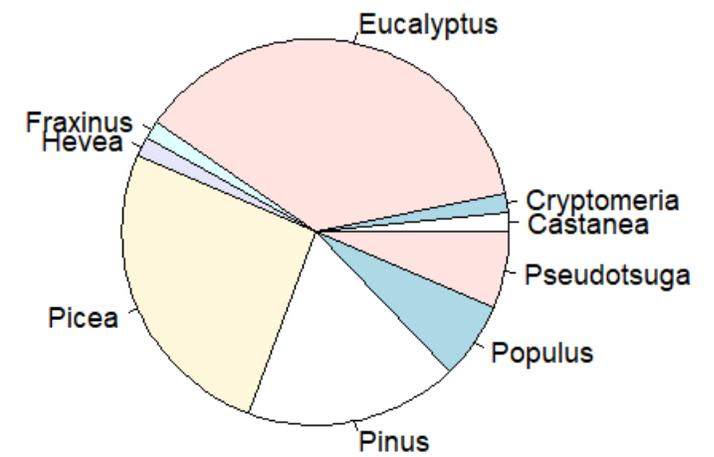
La sélection génomique, est-elle déjà une réalité chez nos essences forestières ?

- 62 études applicatifs entre 2011 et 2020 (2021)
- Compilation non exhaustive, impliquant uniquement des ACL



Species	Conifer/broadleaf	Markers	Individuals	Trait typology	Reference	Year
Castanea dentata	broadleaf	71507	1230	Disease	Westbrook et al 2020	2020
Cryptomeria japonica	conifer	32036	476	Growth & WQ	Hiraoka et al 2018	2018
Eucalyptus cladocalyx	broadleaf	3800	1470	Growth & WQ	Ballesta et al 2020	2020
Eucalyptus globulus	broadleaf	14442	646	Growth & Branch	Ballesta et al 2018	2018
Eucalyptus globulus	broadleaf	14442	646	Growth & WQ	Ballesta et al 2019	2019
Eucalyptus globulus	broadleaf	30019	300	Growth & WQ	Chen et al 2017	2017
Eucalyptus grandis	broadleaf	2836	283	Growth	Cappa et al 2017	2017
Eucalyptus grandis	broadleaf	2816	187	Growth	Cappa et al 2018	2018
Eucalyptus grandis	broadleaf	15040	1548	Growth & WQ	Mphahlele et al 2020	2020
Eucalyptus hybrids	broadleaf	3303	1130	Growth	Bouvet et al 2016	2016
Eucalyptus hybrids	broadleaf	3303	1130	Growth & WQ	Bouvet et al 2020	2020
Eucalyptus hybrids	broadleaf	33398	999	Biochem & WQ	Cappa et al 2019	2019
Eucalyptus hybrids	broadleaf	40932	995	Growth & WQ	De Moraes et al 2018	2018
Eucalyptus hybrids	broadleaf	3129	275	Growth & WQ	Grattapaglia et al 2011	2011
Eucalyptus hybrids	broadleaf	20090	822	Growth & WQ	Lima 2014	2014
Eucalyptus hybrids	broadleaf	19506	732	Growth	Müller et al 2017	2017
Eucalyptus hybrids	broadleaf	3129	275	Growth & WQ	Resende et al 2012a	2012
Eucalyptus hybrids	broadleaf	24806	768	Growth & WQ	Resende et al 2017b	2017
Eucalyptus hybrids	broadleaf	41304	958	Growth & WQ	Tan et al 2017	2017
Eucalyptus hybrids	broadleaf	41304	958	Growth & WQ	Tan et al 2018	2018
Eucalyptus nitens	broadleaf	12236	691	Growth & WQ	Suontama et al 2018	2018
Eucalyptus nitens	broadleaf	12236	691	Growth & WQ	Suontama et al 2019	2019
Eucalyptus pellita	broadleaf	2023	468	Growth & Pulp	Thavamanikumar et al 2020	2020
Eucalyptus polybractea	broadleaf	97000	480	Growth & Biochem	Kainer et al 2018	2018
Eucalyptus robusta	broadleaf	2919	415	Growth & WQ	Rambolarimanana et al 2018	2018
Fraxinus excelsior	broadleaf	50000	1250	Disease	Stocks et al 2019	2019
Hevea brasiliensis	broadleaf	107294	435	Growth	Souza et al 2019	2019
Picea abies	conifer	116765	1370	Growth & WQ	Chen et al 2018	2018
Picea abies	conifer	116765	1370	WQ	Chen et al 2019	2019
Picea abies	conifer	5660	726	WQ	Lenz et al 2020	2020
Picea abies	conifer	5660	726	Growth & WQ & dise	Lenz et al 2020a	2020
Picea abies	conifer	130269	484	Growth & WQ	Zhou et al 2020	2020
Picea glauca	conifer	6932	1748	Growth & WQ	Beaulieu et al 2014a	2014
Picea glauca	conifer	6932	1694	Growth & WQ	Beaulieu et al 2014b	2014
Picea glauca	conifer	4148	1516	Growth & WQ & dise	Beaulieu et al 2020	2020
Picea glauca	conifer	4092	2405	Growth & WQ	Lenz et al 2020b	2020
Picea glauca	conifer	6932	1694	Growth & WQ	Ratcliffe et al 2017	2017
Picea hybrids	conifer	62198	1126	Growth & WQ	El-Dien et al 2015	2015
Picea hybrids	conifer	7338	1694	Growth & WQ	El-Dien et al 2016	2016
Picea hybrids	conifer	30000	1126	Growth & WQ	El-Dien et al 2018	2018
Picea hybrids	conifer	50803	769	Growth & WQ	Ratcliffe et al 2015	2015
Picea mariana	conifer	4993	734	Growth & WQ	Lenz et al 2017	2017
Picea sitchensis	conifer	56000	498	Growth & Pheno	Fuentes-Utrilla et al 2017	2017
Pinus contorta	conifer	19584	1569	Growth & WQ	Ukrainetz and Mansfield 2020	2020
Pinus pinaster	conifer	4332	818	Growth & form	Bartholome et al 2016	2016
Pinus pinaster	conifer	2500	661	Growth & form	Isik et al 2016	2016
Pinus radiata	conifer	67168	1103	Branching	Li et al 2019	2019
Pinus sylvestris	conifer	8719	694	Growth & WQ	Calleja-Rodriguez et al 2019	2019
Pinus taeda	conifer	7216	923	Growth & WQ & dise	De Almeida et al 2016	2016
Pinus taeda	conifer	4852	951	Growth & WQ & dise	Munoz et al 2014	2014
Pinus taeda	conifer	4852	951	Growth & WQ & dise	Resende et al 2012b	2012
Pinus taeda	conifer	4852	926	Growth & WQ & dise	Resende et al 2012c	2012
Pinus taeda	conifer	3461	149	Growth & WQ	Zapata-Valenzuela et al 2012	2012
Pinus taeda	conifer	3461	165	Growth & WQ	Zapata-Valenzuela et al 2013	2013
Populus deltoides	broadleaf	92000	473	Growth	Alves et al 2020	2020
Populus nigra	broadleaf	34000	241	Growth & Pheno & di	Chateigner et al 2020	2020
Populus nigra	broadleaf	7000	1011	Growth & Pheno & di	Pegard et al 2020	2020
Populus nigra	broadleaf	428836	241	Growth & Pheno & di	Wade et al 2021	2021
Pseudotsuga menziesii	conifer	66969	13615	Growth	Ratcliffe et al 2019	2019
Pseudotsuga menziesii	conifer	69551	1372	Growth & WQ	Thistlethwaite et al 2017	2017
Pseudotsuga menziesii	conifer	69551	1321	Growth & WQ	Thistlethwaite et al 2019a	2019
Pseudotsuga menziesii	conifer	56454	1321	Growth & WQ	Thistlethwaite et al 2020a	2020

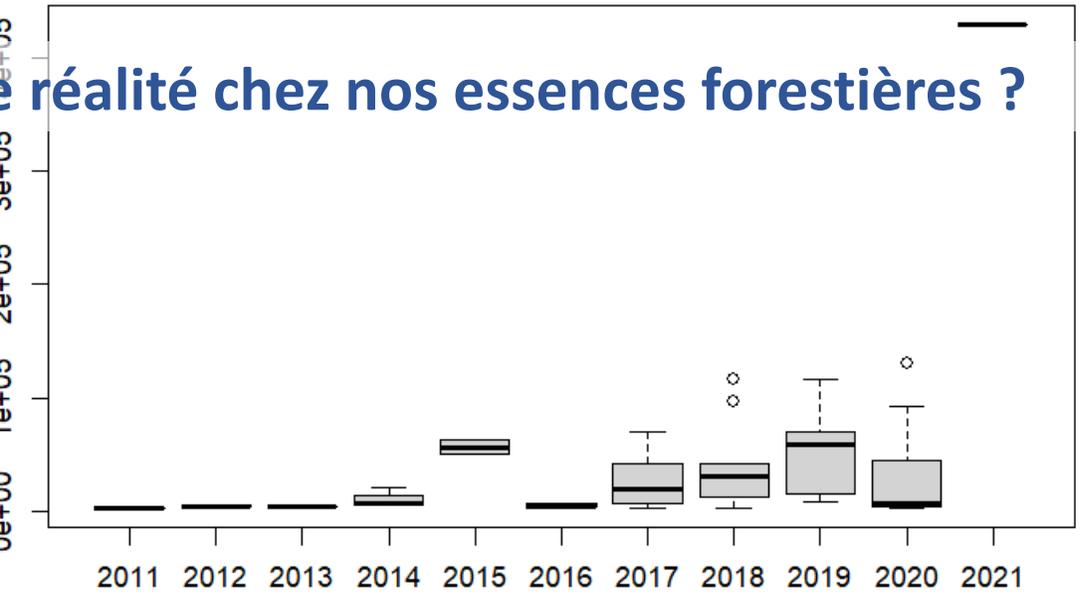
La sélection génomique, est-elle déjà une réalité chez nos essences forestières ?



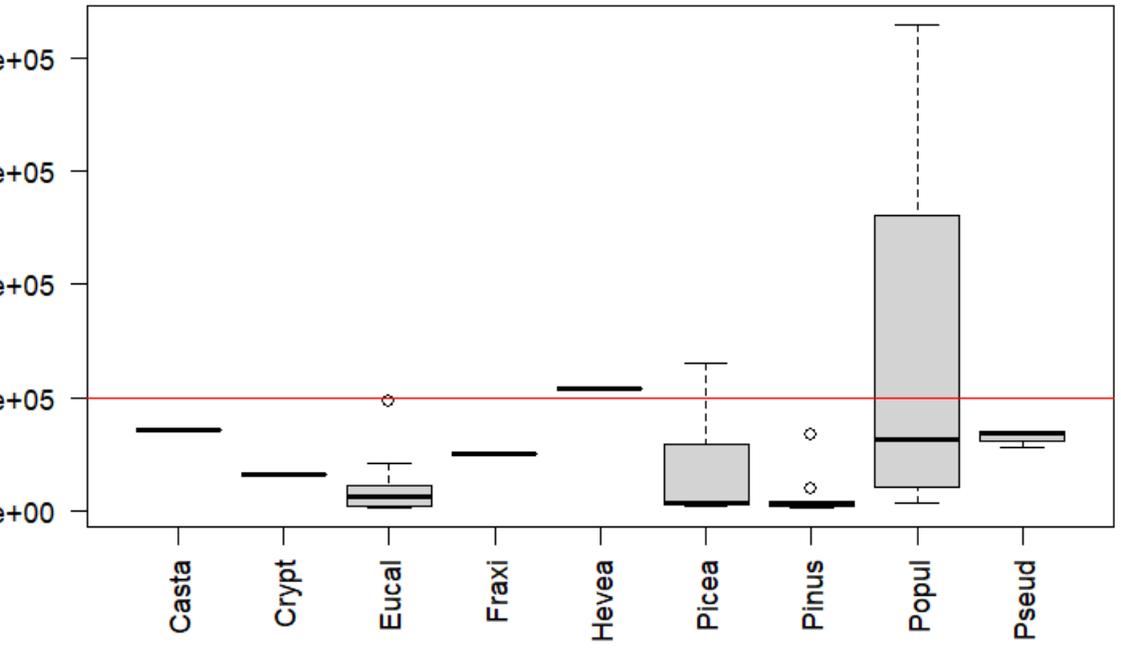
Species	Conifer/broadleaf	Markers	Individuals	Trait typology	Reference	Year
Castanea dentata	broadleaf	71507	1230	Disease	Westbrook et al 2020	2020
Cryptomeria japonica	conifer	32036	476	Growth & WQ	Hiraoka et al 2018	2018
Eucalyptus cladocalyx	broadleaf	3800	1470	Growth & WQ	Ballesta et al 2020	2020
Eucalyptus globulus	broadleaf	14442	646	Growth & Branch	Ballesta et al 2018	2018
Eucalyptus globulus	broadleaf	14442	646	Growth & WQ	Ballesta et al 2019	2019
Eucalyptus globulus	broadleaf	30000	3000	Growth & WQ	Wang et al 2017	2017
Eucalyptus grandis	broadleaf	15040	1548	Growth & WQ	Cappa et al 2018	2018
Eucalyptus grandis	broadleaf	2816	187	Growth	Cappa et al 2018	2018
Eucalyptus grandis	broadleaf	15040	1548	Growth & WQ	Mphahlele et al 2020	2020
Eucalyptus hybrids	broadleaf	3303	1130	Growth	Bouvet et al 2016	2016
Eucalyptus hybrids	broadleaf	3303	1130	Growth & WQ	Bouvet et al 2020	2020
Eucalyptus hybrids	broadleaf	33398	999	Biochem & WQ	Cappa et al 2019	2019
Eucalyptus hybrids	broadleaf	40932	995	Growth & WQ	De Moraes et al 2018	2018
Eucalyptus hybrids	broadleaf	3129	275	Growth & WQ	Grattapaglia et al 2011	2011
Eucalyptus hybrids	broadleaf	20090	822	Growth & WQ	Lima 2014	2014
Eucalyptus hybrids	broadleaf	19506	732	Growth	Müller et al 2017	2017
Eucalyptus hybrids	broadleaf	3129	275	Growth & WQ	Resende et al 2012a	2012
Eucalyptus hybrids	broadleaf	24806	768	Growth & WQ	Resende et al 2017b	2017
Eucalyptus hybrids	broadleaf	41304	958	Growth & WQ	Tan et al 2017	2017
Eucalyptus hybrids	broadleaf	41304	958	Growth & WQ	Tan et al 2018	2018
Eucalyptus nitens	broadleaf	12236	691	Growth & WQ	Suontama et al 2018	2018
Eucalyptus nitens	broadleaf	12236	691	Growth & WQ	Suontama et al 2019	2019
Eucalyptus pellita	broadleaf	2023	468	Growth & Pulp	Thavamanikumar et al 2020	2020
Eucalyptus polybractea	broadleaf	97000	480	Growth & Biochem	Kainer et al 2018	2018
Eucalyptus robusta	broadleaf	2919	415	Growth & WQ	Rambolarimanana et al 2018	2018
Fraxinus excelsior	broadleaf	50000	1250	Disease	Stocks et al 2019	2019
Hevea brasiliensis	broadleaf	107294	435	Growth	Souza et al 2019	2019
Picea abies	conifer	116765	1370	Growth & WQ	Chen et al 2018	2018
Picea abies	conifer	116765	1370	WQ	Chen et al 2019	2019
Picea abies	conifer	5660	726	WQ	Lenz et al 2020	2020
Picea abies	conifer	5660	726	Growth & WQ & dise	Lenz et al 2020a	2020
Picea abies	conifer	130269	484	Growth & WQ	Zhou et al 2020	2020
Picea glauca	conifer	6932	1748	Growth & WQ	Beaulieu et al 2014a	2014
Picea glauca	conifer	6932	1694	Growth & WQ	Beaulieu et al 2014b	2014
Picea glauca	conifer	4148	1516	Growth & WQ & dise	Beaulieu et al 2020	2020
Picea glauca	conifer	4092	2405	Growth & WQ	Lenz et al 2020b	2020
Picea glauca	conifer	6932	1694	Growth & WQ	Ratcliffe et al 2017	2017
Picea hybrids	conifer	62198	1126	Growth & WQ	El-Dien et al 2015	2015
Picea hybrids	conifer	7338	1694	Growth & WQ	El-Dien et al 2016	2016
Picea hybrids	conifer	30000	1126	Growth & WQ	El-Dien et al 2018	2018
Picea hybrids	conifer	50803	769	Growth & WQ	Ratcliffe et al 2015	2015
Picea mariana	conifer	4993	734	Growth & WQ	Lenz et al 2017	2017
Picea sitchensis	conifer	56000	498	Growth & Pheno	Fuentes-Utrilla et al 2017	2017
Pinus contorta	conifer	19584	1569	Growth & WQ	Ukrainetz and Mansfield 2020	2020
Pinus pinaster	conifer	4332	818	Growth & form	Bartholome et al 2016	2016
Pinus pinaster	conifer	2500	661	Growth & form	Isik et al 2016	2016
Pinus radiata	conifer	67168	1103	Branching	Li et al 2019	2019
Pinus sylvestris	conifer	8719	694	Growth & WQ	Calleja-Rodriguez et al 2019	2019
Pinus taeda	conifer	7216	923	Growth & WQ & dise	De Almeida et al 2016	2016
Pinus taeda	conifer	4852	951	Growth & WQ & dise	Munoz et al 2014	2014
Pinus taeda	conifer	4852	951	Growth & WQ & dise	Resende et al 2012b	2012
Pinus taeda	conifer	4852	926	Growth & WQ & dise	Resende et al 2012c	2012
Pinus taeda	conifer	3461	149	Growth & WQ	Zapata-Valenzuela et al 2012	2012
Pinus taeda	conifer	3461	165	Growth & WQ	Zapata-Valenzuela et al 2013	2013
Populus deltoides	broadleaf	92000	473	Growth	Alves et al 2020	2020
Populus nigra	broadleaf	34000	241	Growth & Pheno & di	Chateigner et al 2020	2020
Populus nigra	broadleaf	7000	1011	Growth & Pheno & di	Pegard et al 2020	2020
Populus nigra	broadleaf	428836	241	Growth & Pheno & di	Wade et al 2021	2021
Pseudotsuga menziesii	conifer	66969	13615	Growth	Ratcliffe et al 2019	2019
Pseudotsuga menziesii	conifer	69551	1372	Growth & WQ	Thistlethwaite et al 2017	2017
Pseudotsuga menziesii	conifer	69551	1321	Growth & WQ	Thistlethwaite et al 2019a	2019
Pseudotsuga menziesii	conifer	56454	1321	Growth & WQ	Thistlethwaite et al 2020a	2020

La sélection génomique, est-elle déjà une réalité chez nos essences forestières ?

Number of markers by year

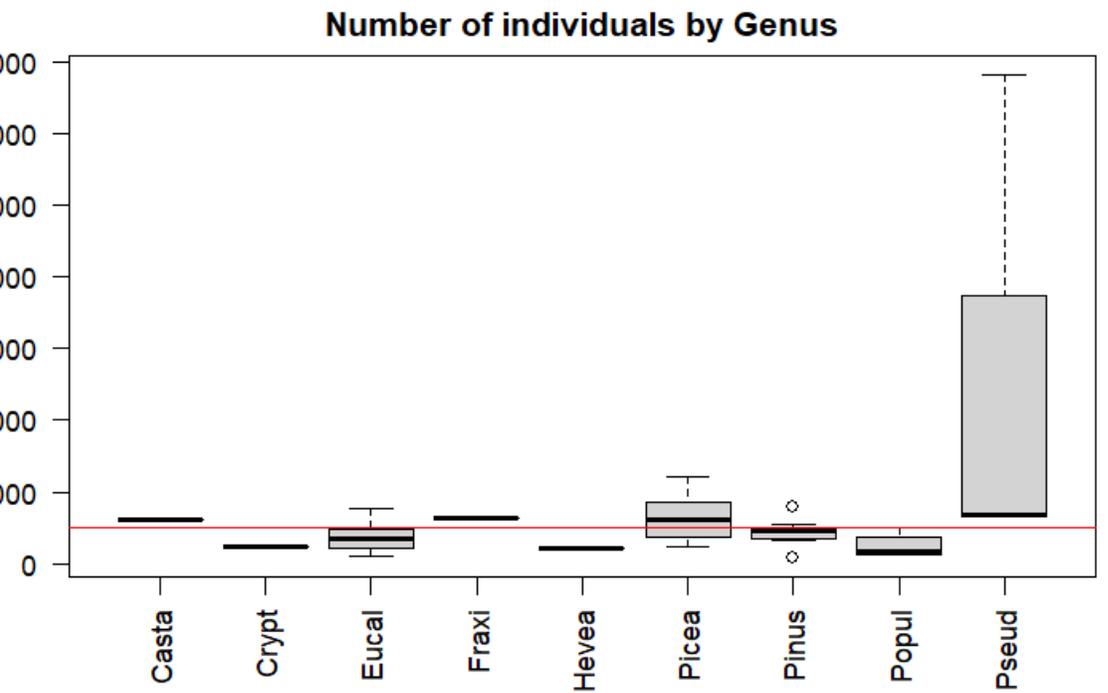
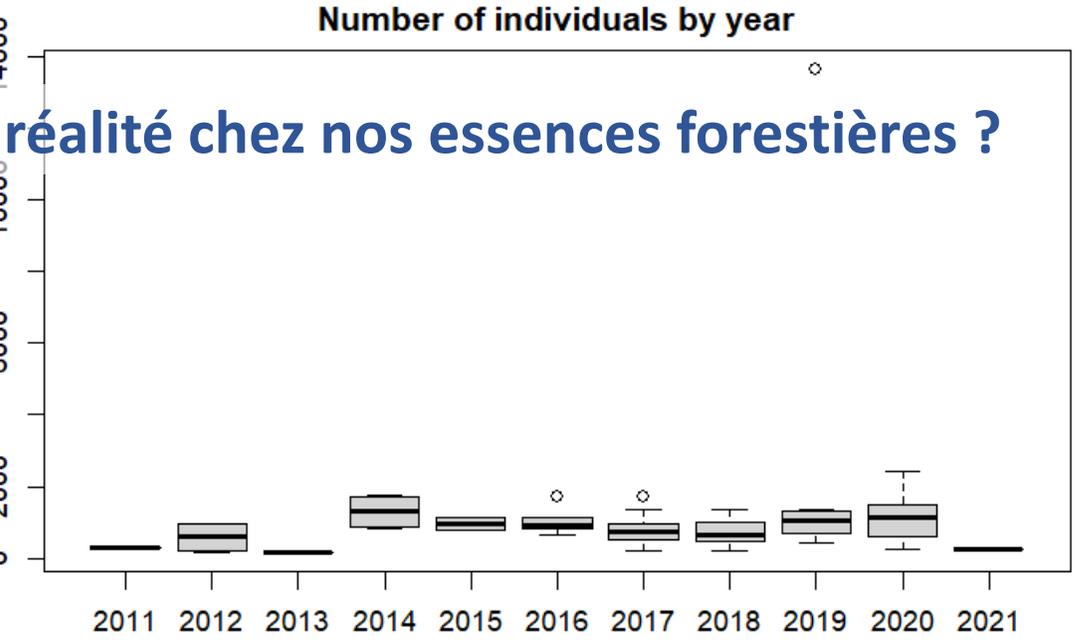


Number of markers by Genus



Species	Conifer/broadleaf	Markers	Individuals	Trait typology	Reference	Year
Castanea dentata	broadleaf	71507	1230	Disease	Westbrook et al 2020	2020
Cryptomeria japonica	conifer	32036	476	Growth & WQ	Hiraoka et al 2018	2018
Eucalyptus cladocalyx	broadleaf	3800	1470	Growth & WQ	Ballesta et al 2020	2020
Eucalyptus globulus	broadleaf	14442	646	Growth & Branch	Ballesta et al 2018	2018
Eucalyptus globulus	broadleaf	14442	646	Growth & WQ	Ballesta et al 2019	2019
Eucalyptus globulus	broadleaf	30019	30019	Growth & WQ	Ballesta et al 2017	2017
Eucalyptus grandis	broadleaf	2836	2836	Growth	Cappa et al 2017	2017
Eucalyptus grandis	broadleaf	2816	187	Growth	Cappa et al 2018	2018
Eucalyptus grandis	broadleaf	15040	1548	Growth & WQ	Mphahlele et al 2020	2020
Eucalyptus hybrids	broadleaf	3303	1130	Growth	Bouvet et al 2016	2016
Eucalyptus hybrids	broadleaf	3303	1130	Growth & WQ	Bouvet et al 2020	2020
Eucalyptus hybrids	broadleaf	33398	999	Biochem & WQ	Cappa et al 2019	2019
Eucalyptus hybrids	broadleaf	40932	995	Growth & WQ	De Moraes et al 2018	2018
Eucalyptus hybrids	broadleaf	3129	275	Growth & WQ	Grattapaglia et al 2011	2011
Eucalyptus hybrids	broadleaf	20090	822	Growth & WQ	Lima 2014	2014
Eucalyptus hybrids	broadleaf	19506	732	Growth	Müller et al 2017	2017
Eucalyptus hybrids	broadleaf	3129	275	Growth & WQ	Resende et al 2012a	2012
Eucalyptus hybrids	broadleaf	24806	768	Growth & WQ	Resende et al 2017b	2017
Eucalyptus hybrids	broadleaf	41304	958	Growth & WQ	Tan et al 2017	2017
Eucalyptus hybrids	broadleaf	41304	958	Growth & WQ	Tan et al 2018	2018
Eucalyptus nitens	broadleaf	12236	691	Growth & WQ	Suontama et al 2018	2018
Eucalyptus nitens	broadleaf	12236	691	Growth & WQ	Suontama et al 2019	2019
Eucalyptus pellita	broadleaf	2023	468	Growth & Pulp	Thavamanikumar et al 2020	2020
Eucalyptus polybractea	broadleaf	97000	480	Growth & Biochem	Kainer et al 2018	2018
Eucalyptus robusta	broadleaf	2919	415	Growth & WQ	Rambolarimanana et al 2018	2018
Fraxinus excelsior	broadleaf	50000	1250	Disease	Stocks et al 2019	2019
Hevea brasiliensis	broadleaf	107294	435	Growth	Souza et al 2019	2019
Picea abies	conifer	116765	1370	Growth & WQ	Chen et al 2018	2018
Picea abies	conifer	116765	1370	WQ	Chen et al 2019	2019
Picea abies	conifer	5660	726	WQ	Lenz et al 2020	2020
Picea abies	conifer	5660	726	Growth & WQ & dise	Lenz et al 2020a	2020
Picea abies	conifer	130269	484	Growth & WQ	Zhou et al 2020	2020
Picea glauca	conifer	6932	1748	Growth & WQ	Beaulieu et al 2014a	2014
Picea glauca	conifer	6932	1694	Growth & WQ	Beaulieu et al 2014b	2014
Picea glauca	conifer	4148	1516	Growth & WQ & dise	Beaulieu et al 2020	2020
Picea glauca	conifer	4092	2405	Growth & WQ	Lenz et al 2020b	2020
Picea glauca	conifer	6932	1694	Growth & WQ	Ratcliffe et al 2017	2017
Picea hybrids	conifer	62198	1126	Growth & WQ	El-Dien et al 2015	2015
Picea hybrids	conifer	7338	1694	Growth & WQ	El-Dien et al 2016	2016
Picea hybrids	conifer	30000	1126	Growth & WQ	El-Dien et al 2018	2018
Picea hybrids	conifer	50803	769	Growth & WQ	Ratcliffe et al 2015	2015
Picea mariana	conifer	4993	734	Growth & WQ	Lenz et al 2017	2017
Picea sitchensis	conifer	56000	498	Growth & Pheno	Fuentes-Utrilla et al 2017	2017
Pinus contorta	conifer	19584	1569	Growth & WQ	Ukrainetz and Mansfield 2020	2020
Pinus pinaster	conifer	4332	818	Growth & form	Bartholome et al 2016	2016
Pinus pinaster	conifer	2500	661	Growth & form	Isik et al 2016	2016
Pinus radiata	conifer	67168	1103	Branching	Li et al 2019	2019
Pinus sylvestris	conifer	8719	694	Growth & WQ	Calleja-Rodriguez et al 2019	2019
Pinus taeda	conifer	7216	923	Growth & WQ & dise	De Almeida et al 2016	2016
Pinus taeda	conifer	4852	951	Growth & WQ & dise	Munoz et al 2014	2014
Pinus taeda	conifer	4852	951	Growth & WQ & dise	Resende et al 2012b	2012
Pinus taeda	conifer	4852	926	Growth & WQ & dise	Resende et al 2012c	2012
Pinus taeda	conifer	3461	149	Growth & WQ	Zapata-Valenzuela et al 2012	2012
Pinus taeda	conifer	3461	165	Growth & WQ	Zapata-Valenzuela et al 2013	2013
Populus deltoides	broadleaf	92000	473	Growth	Alves et al 2020	2020
Populus nigra	broadleaf	34000	241	Growth & Pheno & di	Chateigner et al 2020	2020
Populus nigra	broadleaf	7000	1011	Growth & Pheno & di	Pegard et al 2020	2020
Populus nigra	broadleaf	428836	241	Growth & Pheno & di	Wade et al 2021	2021
Pseudotsuga menziesii	conifer	66969	13615	Growth	Ratcliffe et al 2019	2019
Pseudotsuga menziesii	conifer	69551	1372	Growth & WQ	Thistlethwaite et al 2017	2017
Pseudotsuga menziesii	conifer	69551	1321	Growth & WQ	Thistlethwaite et al 2019a	2019
Pseudotsuga menziesii	conifer	56454	1321	Growth & WQ	Thistlethwaite et al 2020a	2020

La sélection génomique, est-elle déjà une réalité chez nos essences forestières ?



Species	Conifer/broadleaf	Markers	Individuals	Trait typology	Reference	Year
Castanea dentata	broadleaf	71507	1230	Disease	Westbrook et al 2020	2020
Cryptomeria japonica	conifer	32036	476	Growth & WQ	Hiraoka et al 2018	2018
Eucalyptus cladocalyx	broadleaf	3800	1470	Growth & WQ	Ballesta et al 2020	2020
Eucalyptus globulus	broadleaf	14442	646	Growth & Branch	Ballesta et al 2018	2018
Eucalyptus globulus	broadleaf	14442	646	Growth & WQ	Ballesta et al 2019	2019
Eucalyptus globulus	broadleaf	14442	300	Growth & WQ	Ballesta et al 2017	2017
Eucalyptus grandis	broadleaf	15040	1548	Growth	Cappa et al 2022	2017
Eucalyptus grandis	broadleaf	2816	187	Growth	Cappa et al 2018	2018
Eucalyptus grandis	broadleaf	15040	1548	Growth & WQ	Mphahlele et al 2020	2020
Eucalyptus hybrids	broadleaf	3303	1130	Growth	Bouvet et al 2016	2016
Eucalyptus hybrids	broadleaf	3303	1130	Growth & WQ	Bouvet et al 2020	2020
Eucalyptus hybrids	broadleaf	33398	999	Biochem & WQ	Cappa et al 2019	2019
Eucalyptus hybrids	broadleaf	40932	995	Growth & WQ	De Araoz et al 2018	2018
Eucalyptus hybrids	broadleaf	3129	275	Growth & WQ	Graciano et al 2019	2019
Eucalyptus hybrids	broadleaf	20090	822	Growth & WQ	Lima 2014	2014
Eucalyptus hybrids	broadleaf	19506	732	Growth	Müller et al 2017	2017
Eucalyptus hybrids	broadleaf	3129	275	Growth & WQ	Resende et al 2012a	2012
Eucalyptus hybrids	broadleaf	24806	768	Growth & WQ	Resende et al 2017b	2017
Eucalyptus hybrids	broadleaf	41304	958	Growth & WQ	Tan et al 2018	2018
Eucalyptus hybrids	broadleaf	41304	958	Growth & WQ	Tan et al 2018	2018
Eucalyptus nitens	broadleaf	12236	691	Growth & WQ	Suontama et al 2019	2019
Eucalyptus nitens	broadleaf	12236	691	Growth & WQ	Suontama et al 2019	2019
Eucalyptus pellita	broadleaf	2023	468	Growth & Pulp	Thavamanikumar et al 2020	2020
Eucalyptus polybractea	broadleaf	97000	480	Growth & Biochem	Kainer et al 2018	2018
Eucalyptus robusta	broadleaf	2919	415	Growth & WQ	Rambolarimanana et al 2018	2018
Fraxinus excelsior	broadleaf	50000	1250	Disease	Stoks et al 2020	2020
Hevea brasiliensis	broadleaf	107294	435	Growth	Souza et al 2019	2019
Picea abies	conifer	116765	1370	Growth & WQ	Chen et al 2018	2018
Picea abies	conifer	116765	1370	WQ	Chen et al 2019	2019
Picea abies	conifer	5660	726	WQ	Lenz et al 2020	2020
Picea abies	conifer	5660	726	Growth & WQ & dise	Lenz et al 2020	2020
Picea abies	conifer	130269	484	Growth & WQ	Zhou et al 2020	2020
Picea glauca	conifer	6932	1748	Growth & WQ	Beaulieu et al 2014a	2014
Picea glauca	conifer	6932	1694	Growth & WQ	Beaulieu et al 2014b	2014
Picea glauca	conifer	4148	1516	Growth & WQ & dise	Beaulieu et al 2020	2020
Picea glauca	conifer	4092	2405	Growth & WQ	Le et al 2020	2020
Picea glauca	conifer	6932	1694	Growth & WQ	Ratcliffe et al 2015	2015
Picea hybrids	conifer	62198	1126	Growth & WQ	El-Dien et al 2015	2015
Picea hybrids	conifer	7338	1694	Growth & WQ	El-Dien et al 2018	2018
Picea hybrids	conifer	30000	1126	Growth & WQ	El-Dien et al 2018	2018
Picea hybrids	conifer	50803	769	Growth & WQ	Ratcliffe et al 2015	2015
Picea mariana	conifer	4993	734	Growth & WQ	Lenz et al 2017	2017
Picea sitchensis	conifer	56000	498	Growth & Pheno	Fuentes-Utrilla et al 2022	2022
Pinus contorta	conifer	19584	1569	Growth & WQ	Ukuretz and Danz 2017	2017
Pinus pinaster	conifer	4332	818	Growth & form	Bartholome et al 2016	2016
Pinus pinaster	conifer	2500	661	Growth & form	Isik et al 2020	2020
Pinus radiata	conifer	67168	1103	Branching	Li et al 2019	2019
Pinus sylvestris	conifer	8719	694	Growth & WQ	Calleja-Rodriguez et al 2019	2019
Pinus taeda	conifer	7216	923	Growth & WQ & dise	De Almeida et al 2019	2019
Pinus taeda	conifer	4852	951	Growth & WQ & dise	Munoz et al 2014	2014
Pinus taeda	conifer	4852	951	Growth & WQ & dise	Resende et al 2012b	2012
Pinus taeda	conifer	4852	926	Growth & WQ & dise	Resende et al 2012c	2012
Pinus taeda	conifer	3461	149	Growth & WQ	Zapata-Valenzuela et al 2012	2012
Pinus taeda	conifer	3461	165	Growth & WQ	Zapata-Valenzuela et al 2013	2013
Populus deltoides	broadleaf	92000	473	Growth	Alves et al 2020	2020
Populus nigra	broadleaf	34000	241	Growth & Pheno & di	Chateigner et al 2020	2020
Populus nigra	broadleaf	7000	1011	Growth & Pheno & di	Pegard et al 2020	2020
Populus nigra	broadleaf	428836	241	Growth & Pheno & di	Wade et al 2021	2021
Pseudotsuga menziesii	conifer	66969	13615	Growth	Ratcliffe et al 2019	2019
Pseudotsuga menziesii	conifer	69551	1372	Growth & WQ	Thistlethwaite et al 2017	2017
Pseudotsuga menziesii	conifer	69551	1321	Growth & WQ	Thistlethwaite et al 2019a	2019
Pseudotsuga menziesii	conifer	56454	1321	Growth & WQ	Thistlethwaite et al 2020a	2020

La sélection génomique, est-elle déjà une réalité chez nos essences forestières ?

Conclusions générales review

- Les précisions de prédiction sont compétitives, égalant ou dépassant celles obtenues précédemment avec un système traditionnel

- Certains des principaux facteurs qui déterminent les précisions sont la « proximité » entre les pools de calibration et de validation : en termes d'apparementement, d'environnement d'essai s'il existe des interactions GxE, et de différences d'âge à âge

- Les méthodologies d'évaluation ont en général peu ou pas d'impact sur les résultats. Globalement, le rr-BLUP (ou le G-BLUP), plus simple, est le plus efficace.

- La sélection génomique a été principalement appliquée en échantillonnant dans les structures d'évaluation existantes de tests de descendance et clonaux, et en utilisant la diversité disponible.

Species	Conifer/broadleaf	Markers	Individuals	Trait typology	Reference	Year
Castanea dentata	broadleaf	71507	1230	Disease	Westbrook et al 2020	2020
Cryptomeria japonica	conifer	32036	476	Growth & WQ	Hiraoka et al 2018	2018
Eucalyptus cladocalyx	broadleaf	3800	1470	Growth & WQ	Ballesta et al 2020	2020
Eucalyptus globulus	broadleaf	14442	646	Growth & Branch	Ballesta et al 2018	2018
Eucalyptus globulus	broadleaf	14442	646	Growth & WQ	Ballesta et al 2019	2019
Eucalyptus globulus	broadleaf	30000	3000	Growth & WQ	Griffiths et al 2017	2017
Eucalyptus grandis	broadleaf	2836	283	Growth	Cappa et al 2017	2017
Eucalyptus grandis	broadleaf	2816	187	Growth	Cappa et al 2018	2018
Eucalyptus grandis	broadleaf	15040	1548	Growth & WQ	Mphahlele et al 2020	2020
Eucalyptus hybrids	broadleaf	3303	1130	Growth	Bouvet et al 2016	2016
Eucalyptus hybrids	broadleaf	3303	1130	Growth & WQ	Bouvet et al 2020	2020
Eucalyptus hybrids	broadleaf	33398	999	Biochem & WQ	Cappa et al 2019	2019
Eucalyptus hybrids	broadleaf	40932	995	Growth & WQ	De Moraes et al 2018	2018
Eucalyptus hybrids	broadleaf	3129	275	Growth & WQ	Griffiths et al 2017	2017
Eucalyptus hybrids	broadleaf	20090	822	Growth & WQ	Lima 2014	2014
Eucalyptus hybrids	broadleaf	19506	732	Growth	Müller et al 2017	2017
Eucalyptus hybrids	broadleaf	3129	275	Growth & WQ	Resende et al 2012a	2012
Eucalyptus hybrids	broadleaf	24806	768	Growth & WQ	Resende et al 2017b	2017
Eucalyptus hybrids	broadleaf	41304	958	Growth & WQ	Tan et al 2018	2018
Eucalyptus hybrids	broadleaf	41304	958	Growth & WQ	Tan et al 2018	2018
Eucalyptus nitens	broadleaf	12236	691	Growth & WQ	Suontama et al 2018	2018
Eucalyptus nitens	broadleaf	12236	691	Growth & WQ	Suontama et al 2018	2018
Eucalyptus pellita	broadleaf	2023	468	Growth & Pulp	Thavamanikumar et al 2020	2020
Eucalyptus polybractea	broadleaf	97000	480	Growth & Biochem	Kainer et al 2019	2019
Eucalyptus robusta	broadleaf	2919	415	Growth & WQ	Rambolarimananjane et al 2016	2016
Fraxinus excelsior	broadleaf	50000	1250	Disease	Stocks et al 2019	2019
Hevea brasiliensis	broadleaf	107294	435	Growth	Souza et al 2019	2019
Picea abies	conifer	116765	1370	Growth & WQ	Chen et al 2018	2018
Picea abies	conifer	116765	1370	WQ	Chen et al 2018	2018
Picea abies	conifer	5660	726	WQ	Lenz et al 2020a	2020
Picea abies	conifer	5660	726	Growth & WQ & dise	Lenz et al 2020b	2020
Picea abies	conifer	130269	484	Growth & WQ	Zhou et al 2020	2020
Picea glauca	conifer	6932	1748	Growth & WQ	Beaulieu et al 2014a	2014
Picea glauca	conifer	6932	1694	Growth & WQ	Beaulieu et al 2014b	2014
Picea glauca	conifer	4148	1516	Growth & WQ & dise	Beaulieu et al 2020	2020
Picea glauca	conifer	4092	2405	Growth & WQ	Lenz et al 2020b	2020
Picea glauca	conifer	6932	1694	Growth & WQ	Ratcliffe et al 2015	2015
Picea hybrids	conifer	62198	1126	Growth & WQ	El-Dien et al 2015	2015
Picea hybrids	conifer	7338	1694	Growth & WQ	El-Dien et al 2016	2016
Picea hybrids	conifer	30000	1126	Growth & WQ	El-Dien et al 2018	2018
Picea hybrids	conifer	50803	769	Growth & WQ	Ratcliffe et al 2015	2015
Picea mariana	conifer	4993	734	Growth & WQ	Lenz et al 2017	2017
Picea sitchensis	conifer	56000	498	Growth & Pheno	Fuentes-Utrilla et al 2017	2017
Pinus contorta	conifer	19584	1569	Growth & WQ	Ukrainetz and Mesfin 2020	2020
Pinus pinaster	conifer	4332	818	Growth & form	Bartholome et al 2019	2019
Pinus pinaster	conifer	2500	661	Growth & form	Isik et al 2016	2016
Pinus radiata	conifer	67168	1103	Branching	Li et al 2019	2019
Pinus sylvestris	conifer	8719	694	Growth & WQ	Calleja-Rodriguez et al 2019	2019
Pinus taeda	conifer	7216	923	Growth & WQ & dise	De Almeida et al 2016	2016
Pinus taeda	conifer	4852	951	Growth & WQ & dise	Munoz et al 2014	2014
Pinus taeda	conifer	4852	951	Growth & WQ & dise	Resende et al 2012b	2012
Pinus taeda	conifer	4852	926	Growth & WQ & dise	Resende et al 2012c	2012
Pinus taeda	conifer	3461	149	Growth & WQ	Zapata-Valenzuela et al 2012	2012
Pinus taeda	conifer	3461	165	Growth & WQ	Zapata-Valenzuela et al 2013	2013
Populus deltoides	broadleaf	92000	473	Growth	Alves et al 2020	2020
Populus nigra	broadleaf	34000	241	Growth & Pheno & di	Chateigner et al 2020	2020
Populus nigra	broadleaf	7000	1011	Growth & Pheno & di	Pegard et al 2020	2020
Populus nigra	broadleaf	428836	241	Growth & Pheno & di	Wade et al 2021	2021
Pseudotsuga menziesii	conifer	66969	13615	Growth	Ratcliffe et al 2019	2019
Pseudotsuga menziesii	conifer	69551	1372	Growth & WQ	Thistlethwaite et al 2017	2017
Pseudotsuga menziesii	conifer	69551	1321	Growth & WQ	Thistlethwaite et al 2019a	2019
Pseudotsuga menziesii	conifer	56454	1321	Growth & WQ	Thistlethwaite et al 2020a	2020

La sélection génomique, est-elle déjà une réalité chez nos essences forestières ?

Conclusions générales review

La plupart des études correspondent à des approches de « preuve de concept » plutôt qu'à des applications opérationnelles (pas forcément reprises dans les revues scientifiques), l'eucalyptus et Picea pourraient constituer des exceptions.

Gain de temps ? Oui, mais pas toujours (maturité sexuelle)

Gain de précision ? Plutôt oui

Gain d'intensité de sélection ? Oui, mais pas encore assez de récurrence opérationnelle

Nombre de groupes de recherche assez réduit, des groupes spécialisés dans 1 ou plusieurs espèces taxonomiquement proches (Canada, Brésil, Europe, ...)

The big picture of GS in Europe

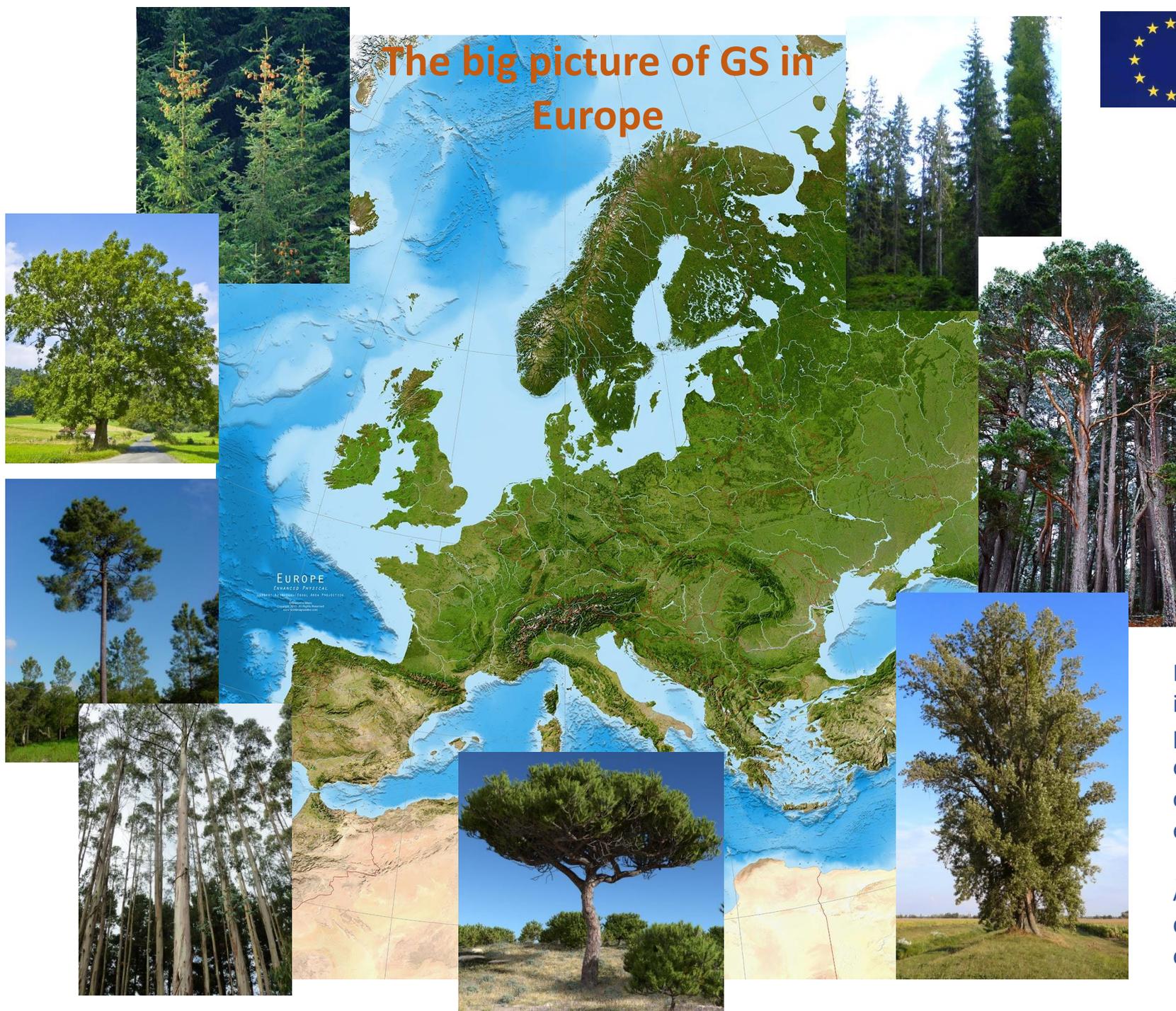


“Increase forest survival, health, resilience and productivity under climate change and natural disturbances, while maintaining genetic diversity and key ecological functions”

2018-2022
19 partenaires
8 espèces

Derrière l'ensemble des essences forestières, il y a une réalité très hétérogène, avec des programmes de sélection, un contexte socio-économique et des connaissances et contraintes biologiques très différents entre espèces.

À cette réalité s'ajoute un ratio typiquement défavorable de nombre de chercheurs par espèce.



Pin maritime



Focus sur deux espèces en France

Peuplier



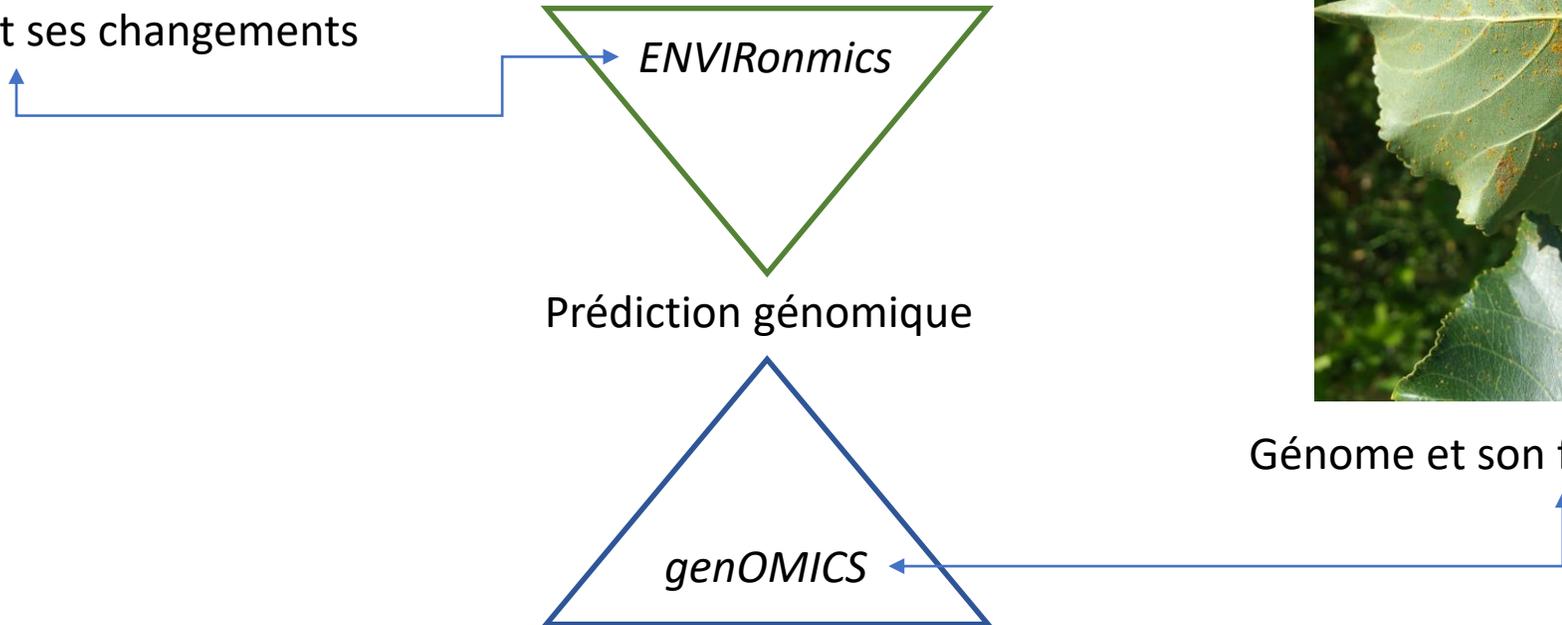
Environnement et ses changements

ENVIRONmics

Prédiction génomique

genOMICS

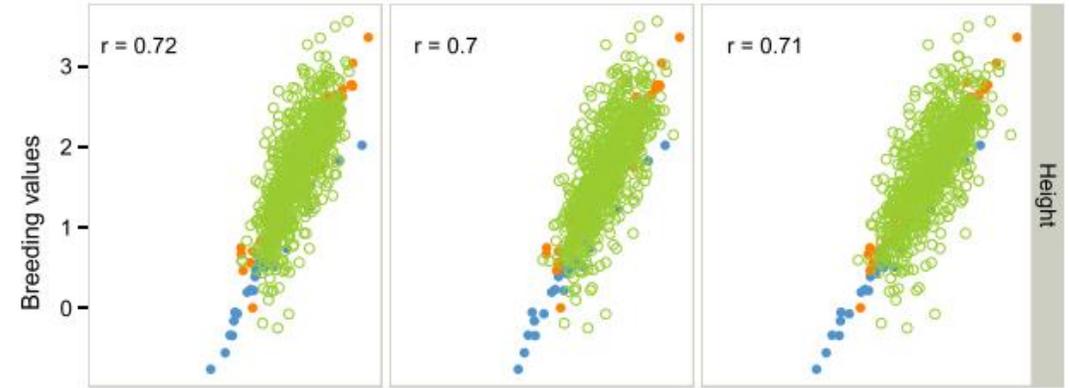
Génome et son fonctionnement





Focus sur Pin maritime

- Début dans les années **1960** et géré par le GIS Pin Maritime du Futur
- Schéma de **sélection récurrente** (3eme génération)
- Estimation des **valeurs génétiques** à partir du **pedigree**
- Variétés améliorées en termes de
 - **Croissance** (hauteur, circonférence, rectitude)
 - **Adaptation** au milieu
 - **Qualité** du bois

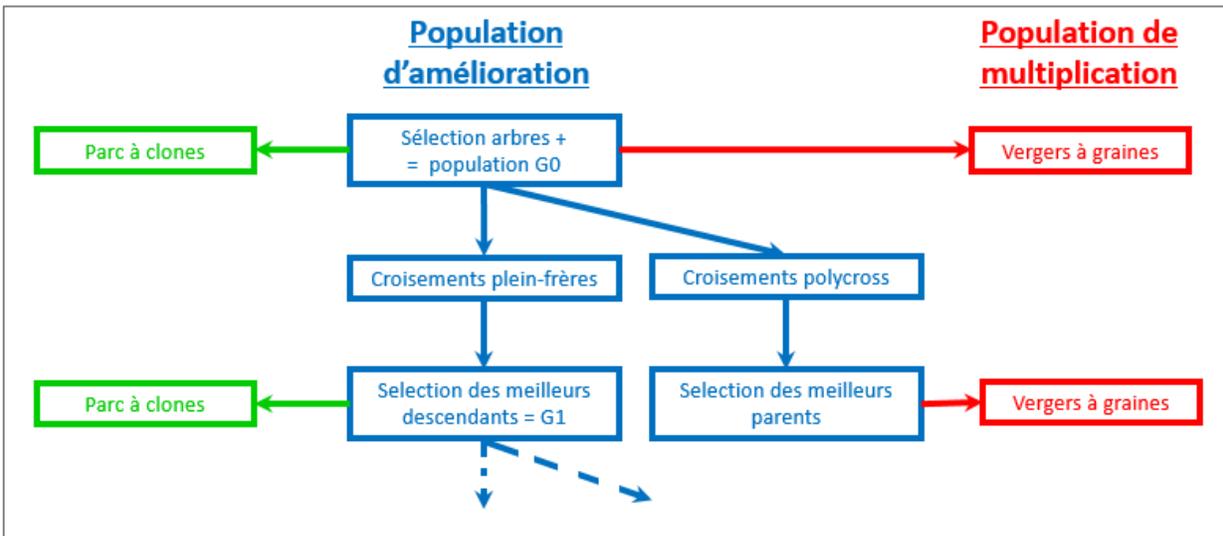


Bartholomé et al. BMC Genomics (2016) 17:604
DOI 10.1186/s12864-016-2879-8

Réduire la durée des cycles de sélection

Intrégrer des caractères complexes

Augmenter l'intensité de sélection



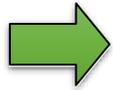
Initiatives « *preuve de concept* » (Bartholome et al 2016, Isik et al 2016) :

- L'évaluation génomique atteint des performances similaires à celles de l'évaluation pedigree
- Cadre expérimental basé sur plan factoriel, avec peu de place pour la sélection intra-familiale
- Couverture faible des puces de génotypage disponibles à l'époque (<5000)

Intégration de caractères - fonction en sélection génomique

Sélection génomique souvent basée sur des caractères ponctuels de production
(Hauteur, Volume, Rectitude)

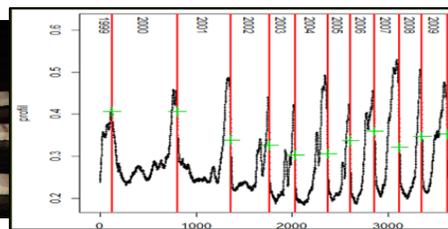
- Données très intégratives, sans prise en compte de l'environnement
- Contexte evolution rapide des conditions climatiques



Modéliser et prédire les capacités d'adaptation du pin maritime

Carottage de bois et analyses radiographiques

Bois : marqueur rétrospectif de la croissance de l'arbre et de l'activité cambiale au cours des années



Données phénotypiques

Données génétiques
(pedigrees, génotypage)

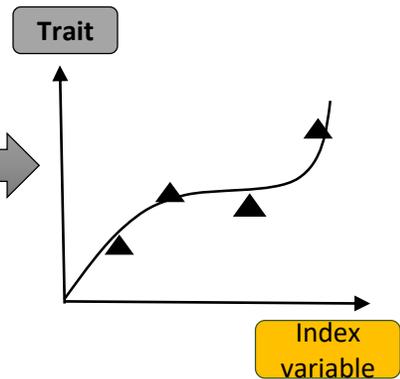
Variable index
(âge, indice environm.)

Normes de réactions avec des modèles de régression aléatoire

- ✓ Traits très explicatifs
- ✓ Prédictions de la réaction d'arbres dans des environnements non-observés



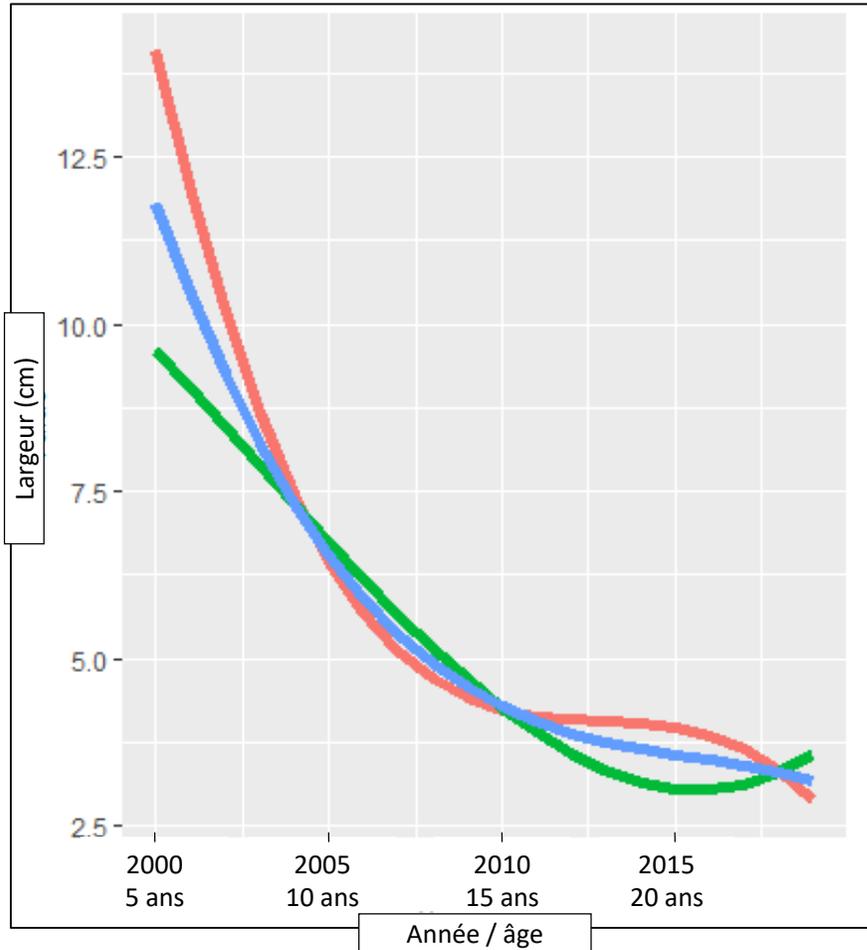
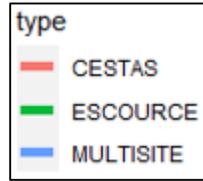
Approche trait-fonction



Thèse Victor Papin (2020-2023)
UMR BIOFORA – UMR BIOGECO

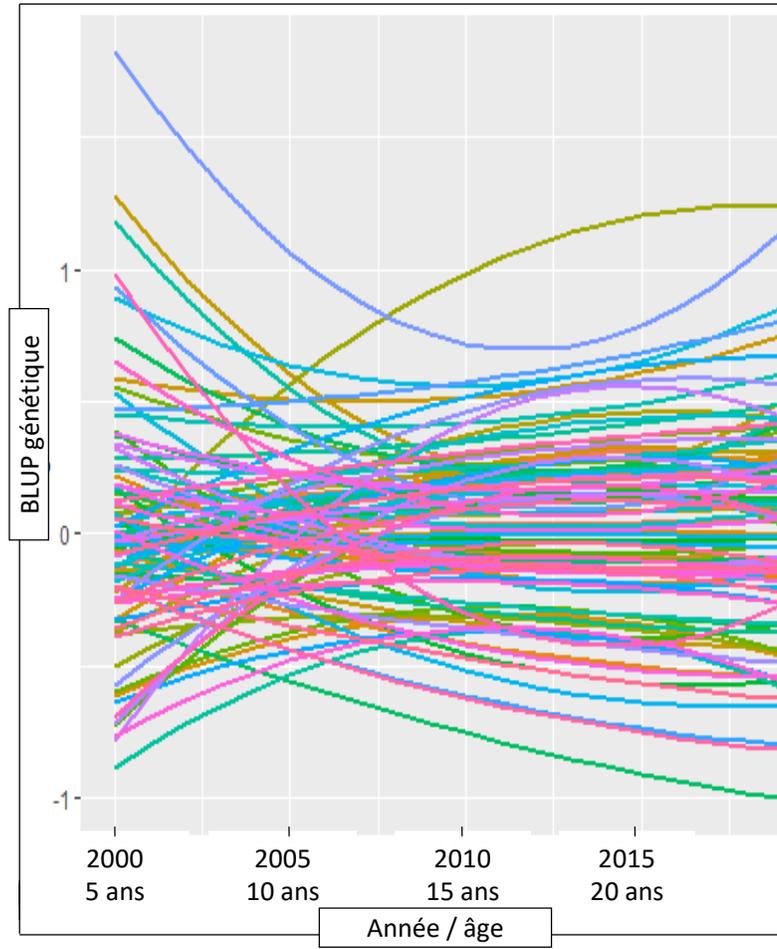
Modélisation : Largeur en fonction année

Partie FIXE :
trajectoires moyennes

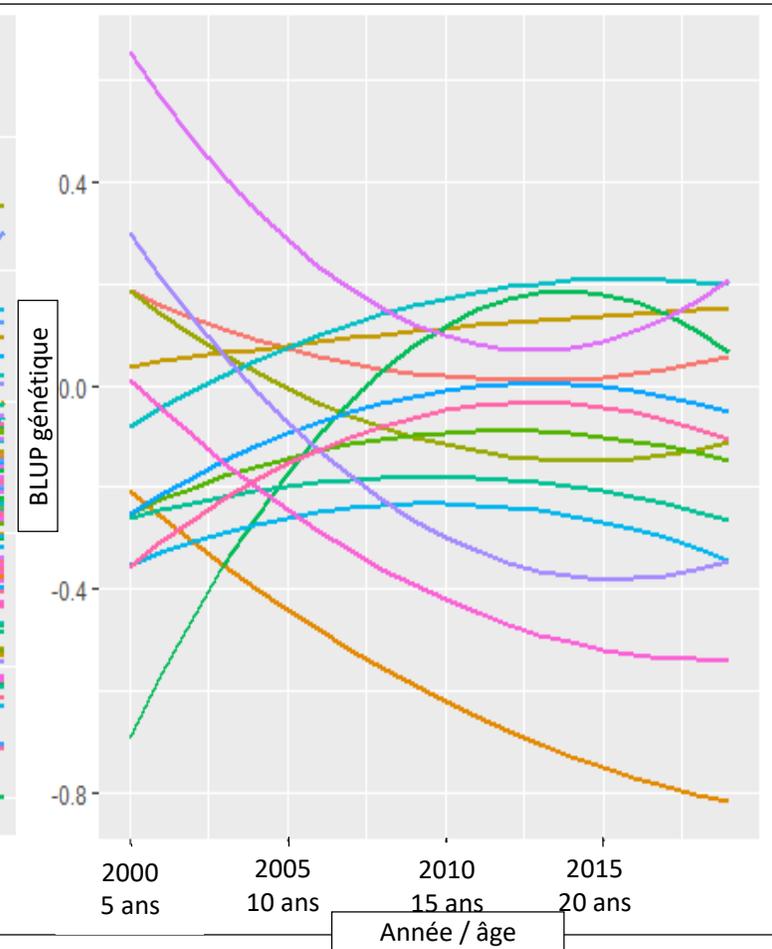


Partie ALEATOIRE : trajectoires parties génétiques additives

Trajectoires individuelles

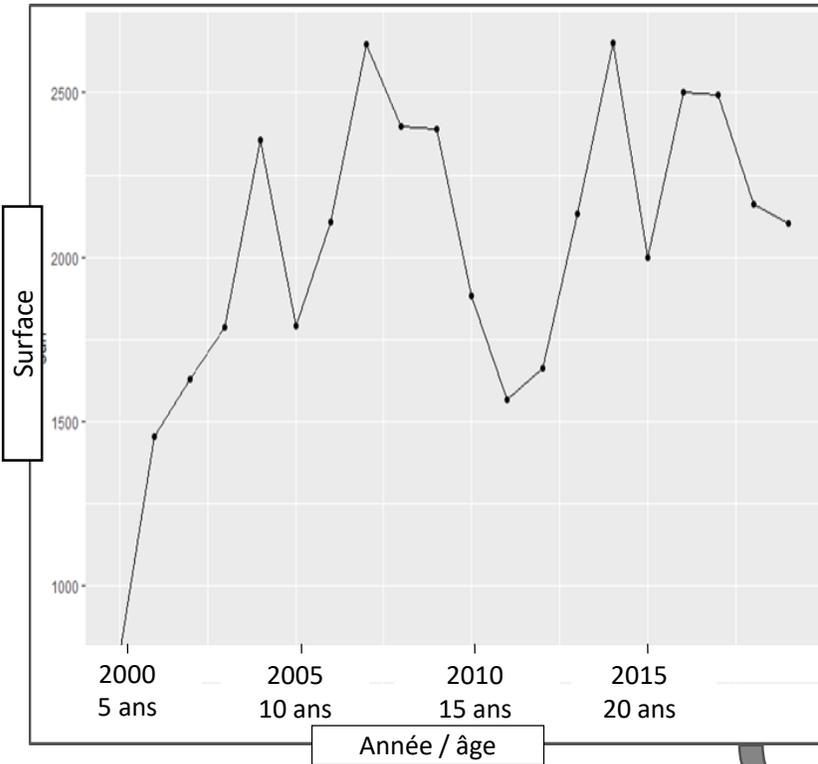


Trajectoires par famille

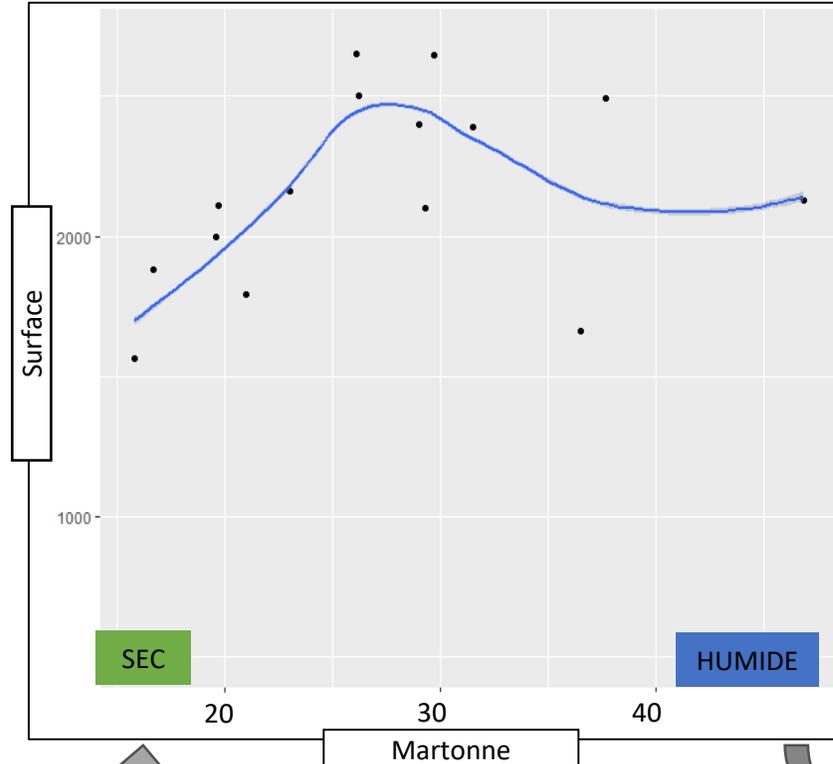


Modélisation : Surface en fonction de l'aridité annuelle

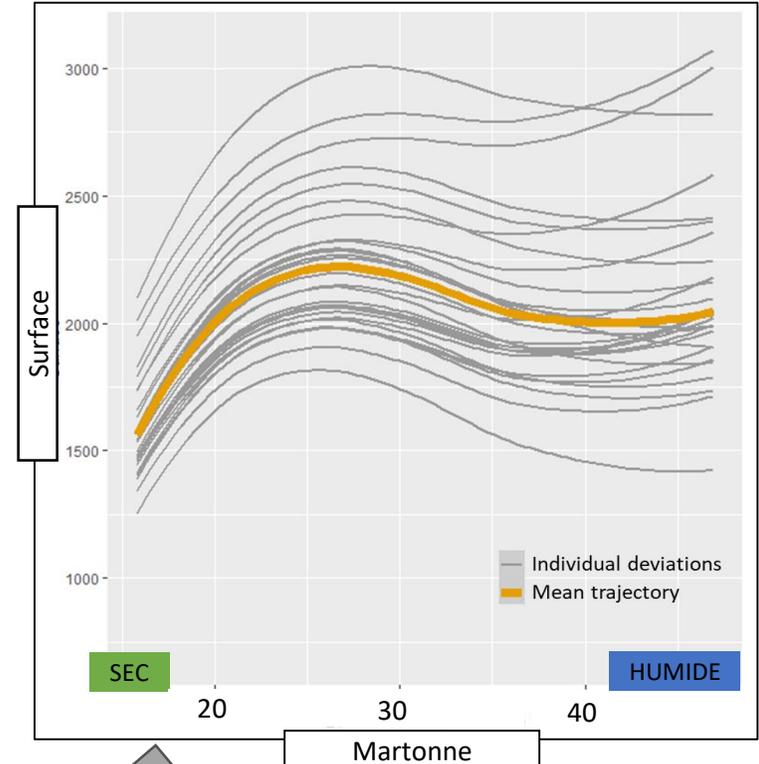
Evolution des surfaces de cernes en fonction de l'année



Evolution des surfaces de cernes selon indice de sécheresse



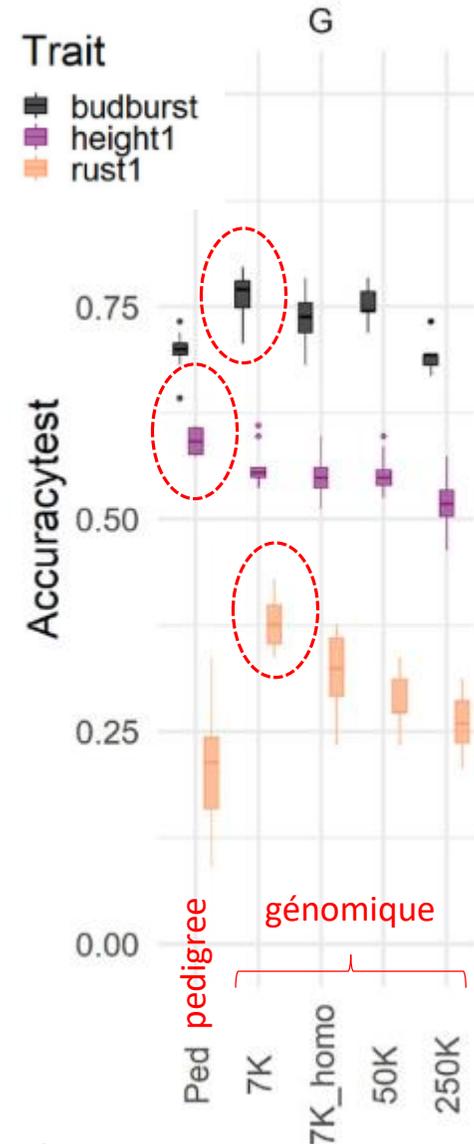
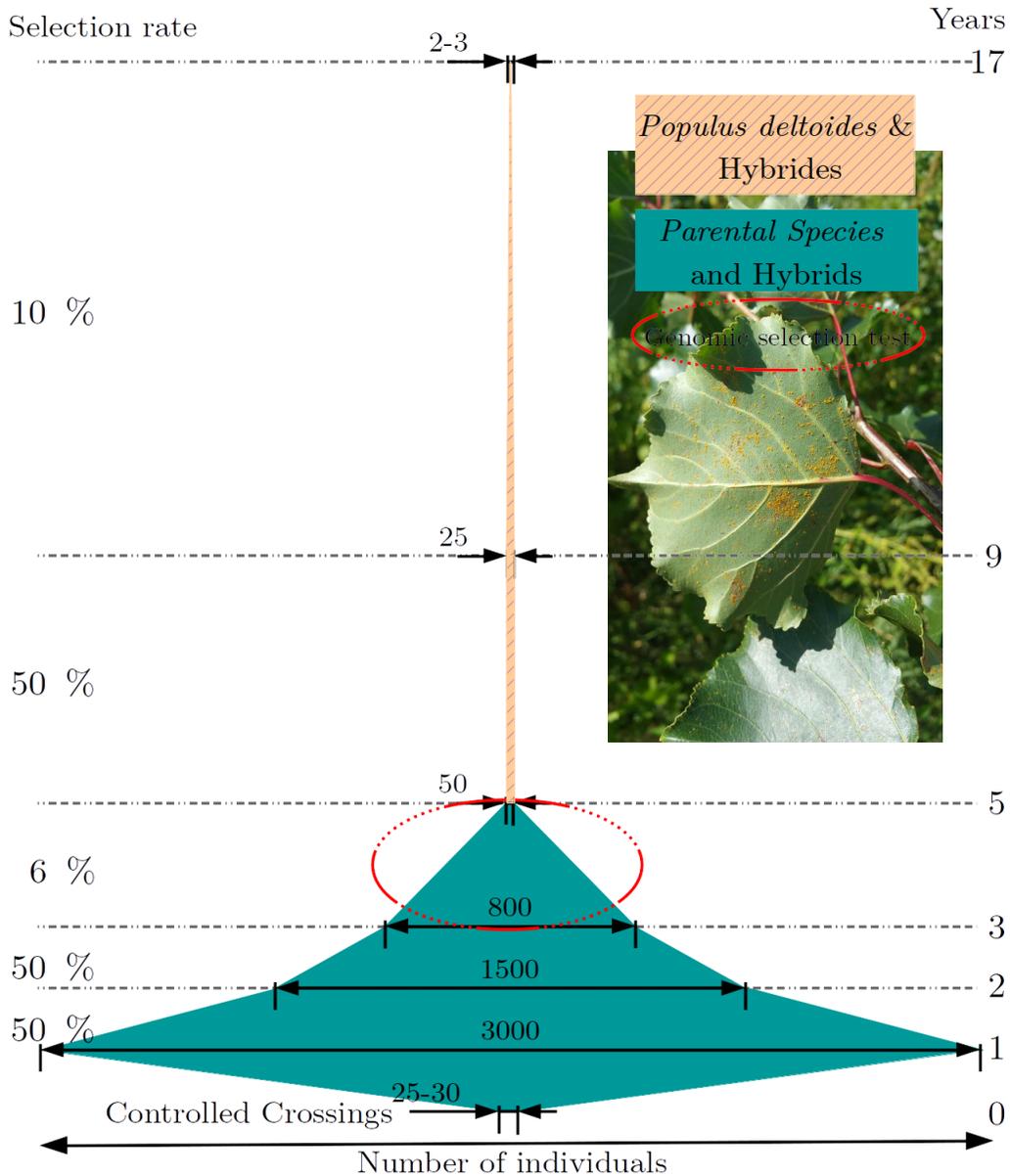
Modélisation par Random Regression



Ré-organisation

Modélisation

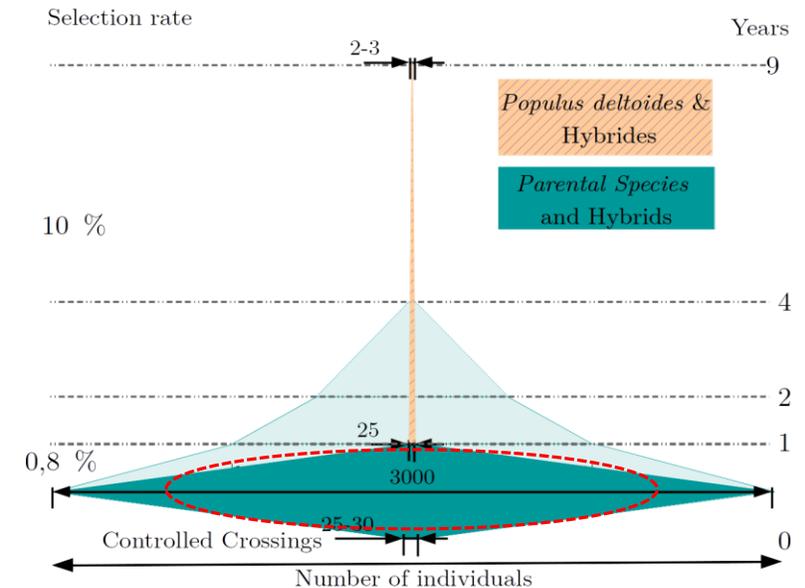
Focus sur peuplier



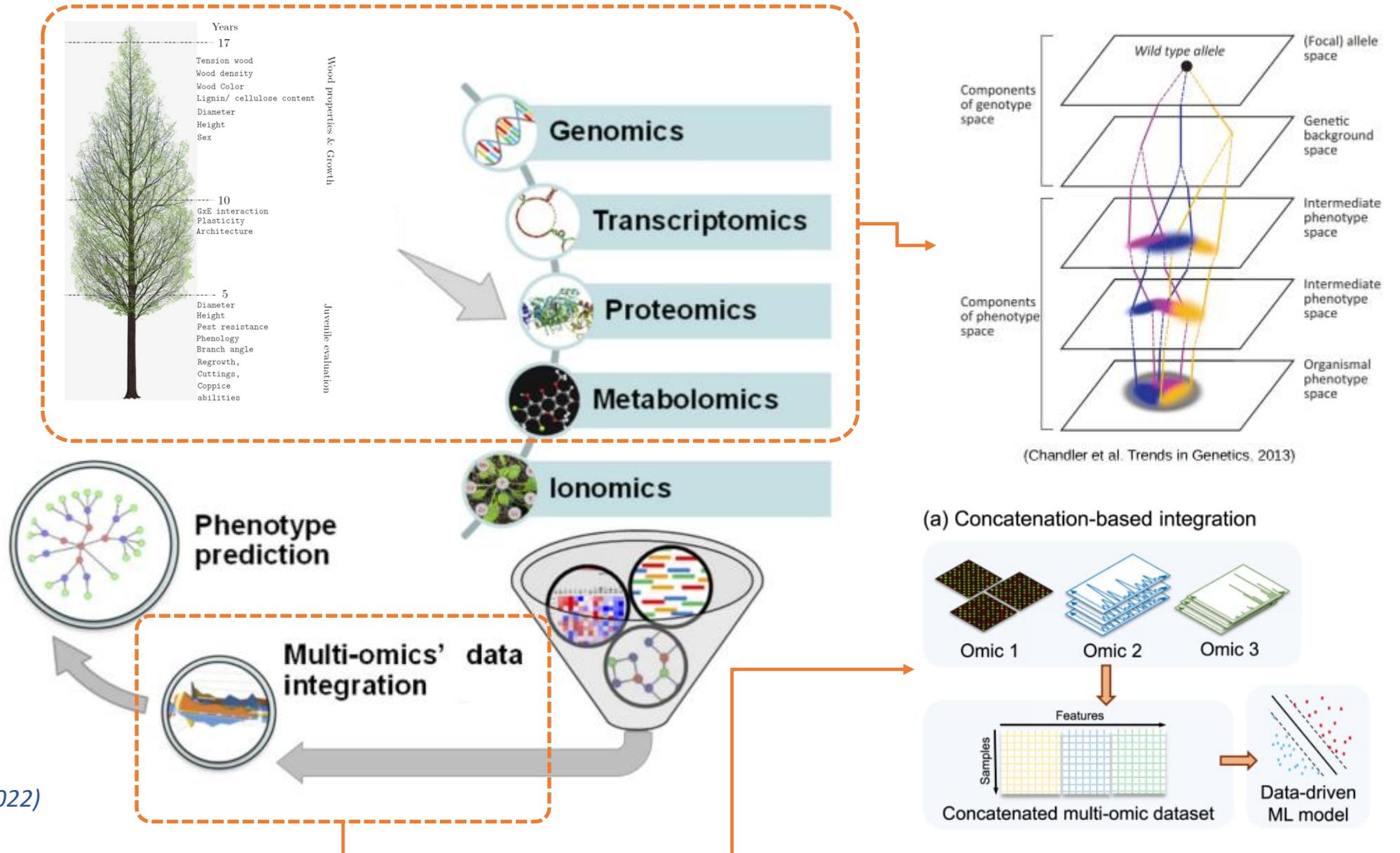
Pégard et al 2020
doi: 10.3389/fpls.2020.581954

Les avantages de la SG dépendent du contexte :

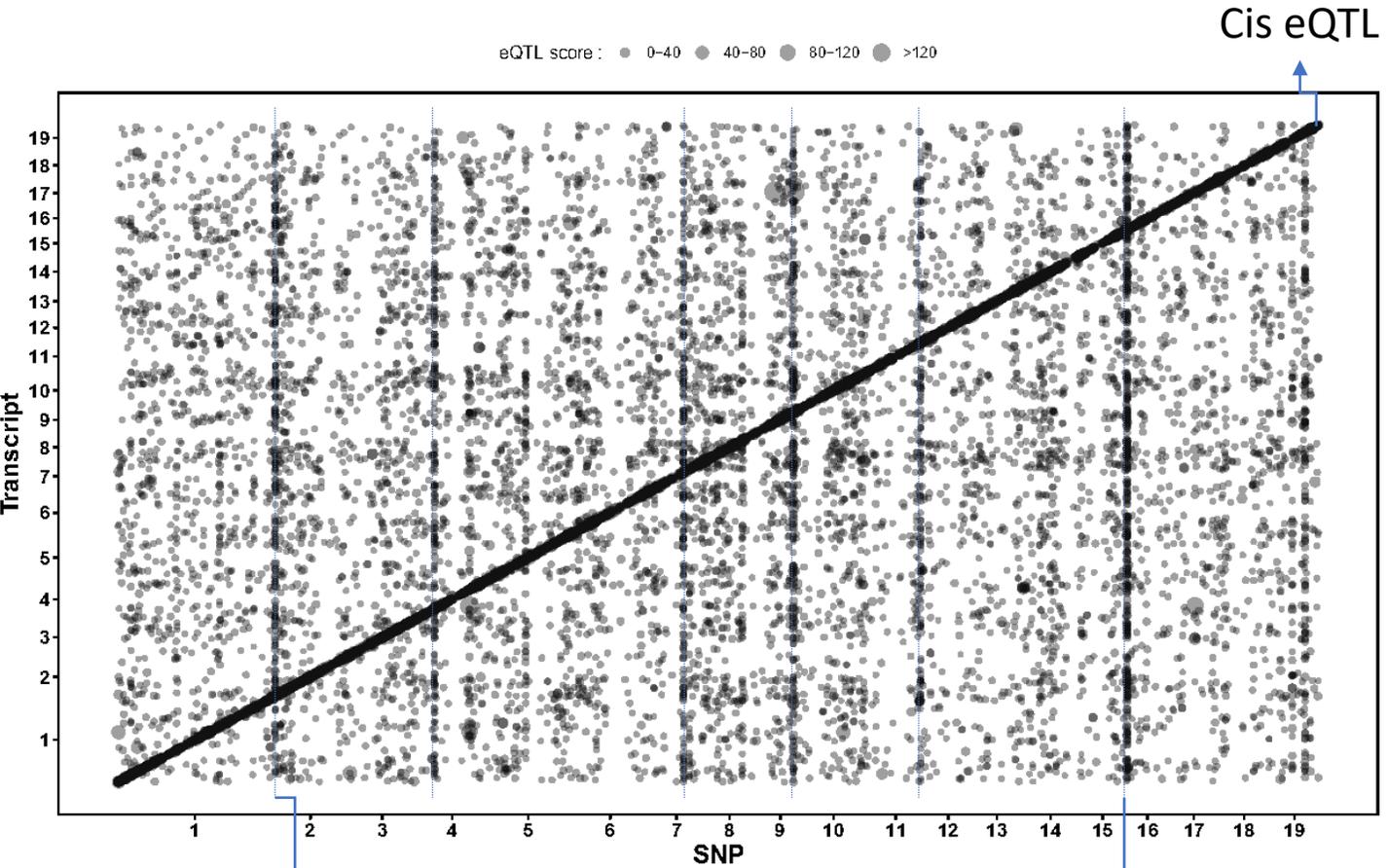
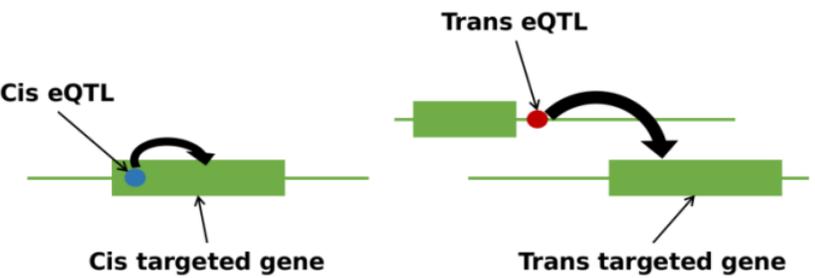
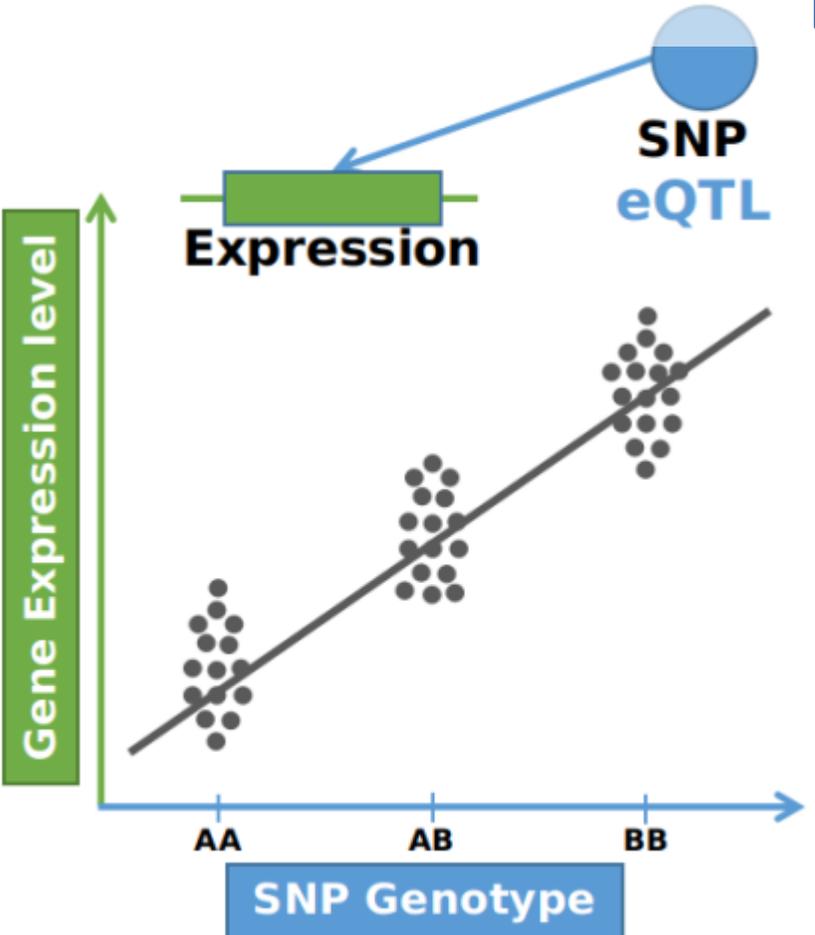
- Ses performances sont comparables à celles du pedigree en conditions standard.
- La SG s'est avérée avantageuse dans des scénarios moins standard.
- La SG, une option pour la sélection précoce, où la précision de la sélection est généralement faible et la variabilité génétique abondante.



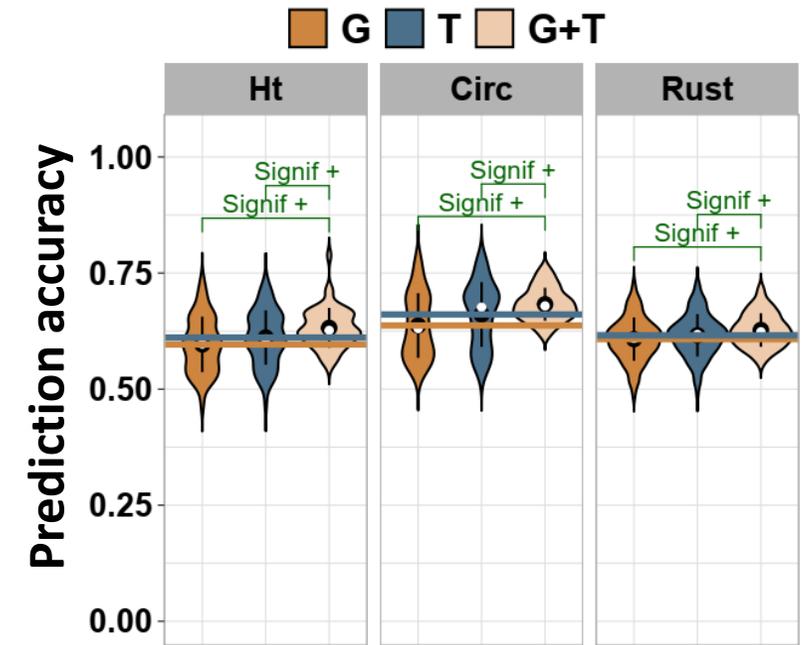
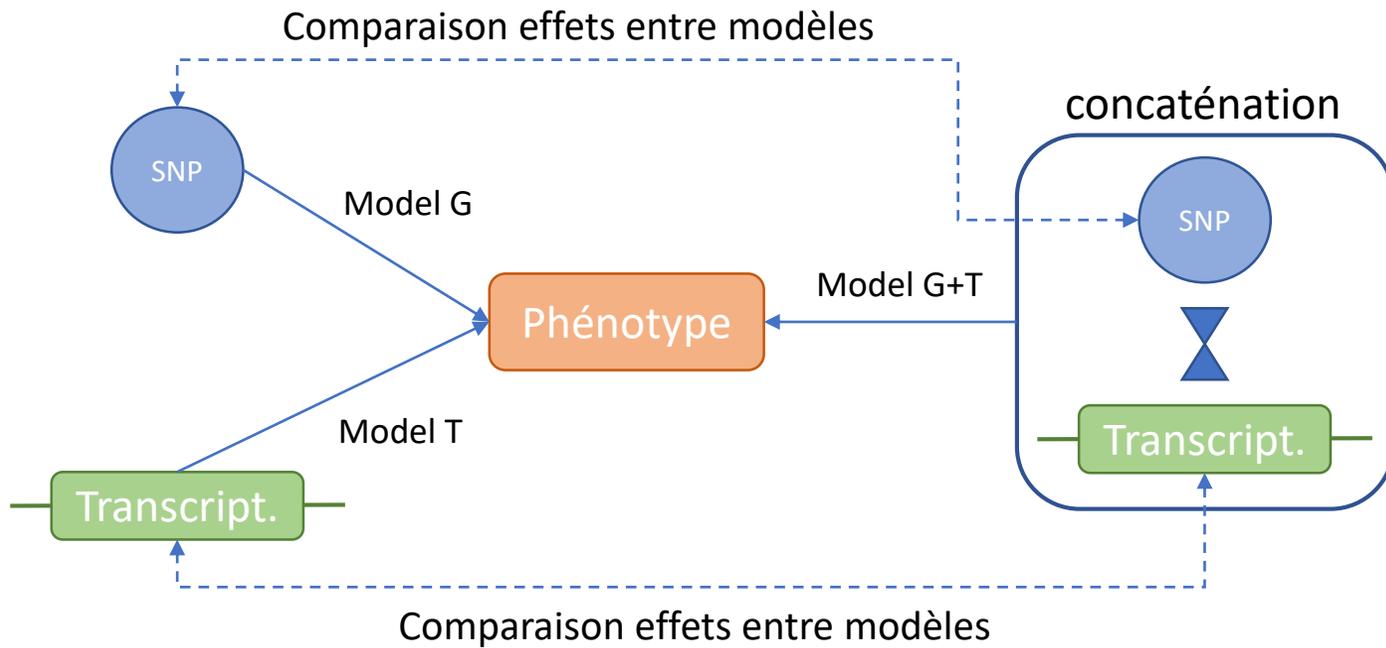
Interpréter le phénotype en fonction d'autres mécanismes génomiques sous-jacents



Liens entre transcrits et polymorphismes SNP



Exemples de Trans eQTL

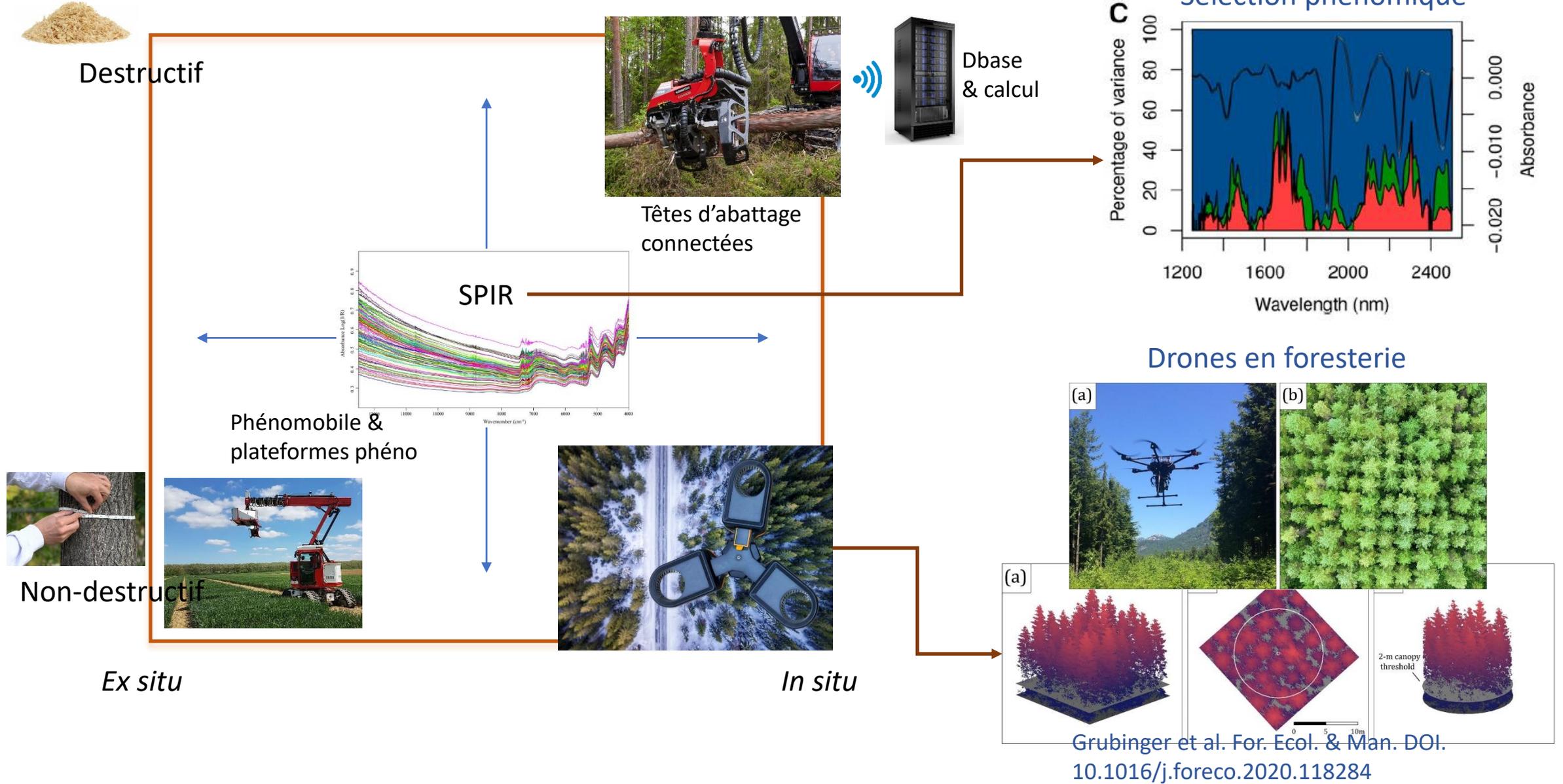


Conclusions :

- L'avantage de la concaténation varie selon les traits (pertinence des transcrits ? ...)
- La qualité de la prédiction fortement associée aux changements dans le classement des effets lorsque la concaténation a lieu.
- Pour les traits présentant le plus grand avantage avec concaténation, les changements dans les effets se sont produits pour les eQTL redondants. Pour les traits sans avantage, peu ou pas de changements dans les effets.
- La prise en compte des interactions entre « *omiques* » et leurs redondances est une étape essentielle pour améliorer la prédiction des phénotypes et gagner en explicabilité.

Facilitation et multi-dimensionnalité du phénotypage

Rincenc et al. G3. DOI.
10.1534/g3.118.200760



Développer la statistique spatiale en conditions forestières

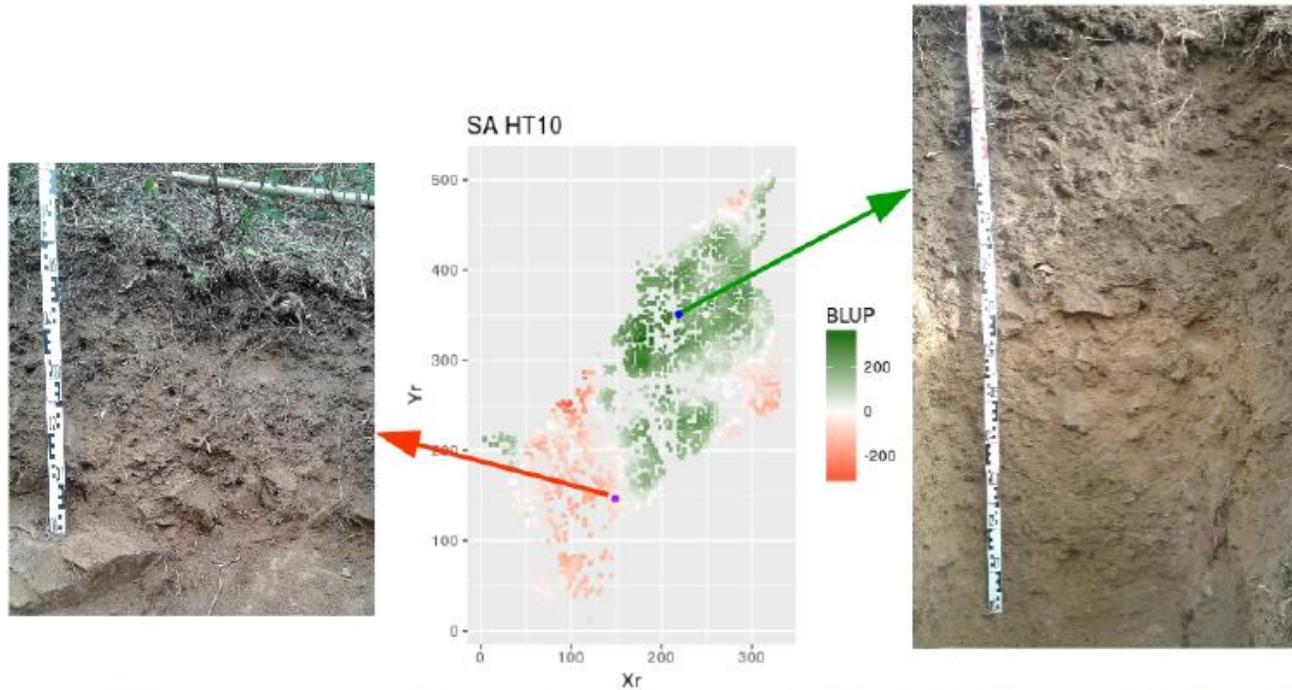
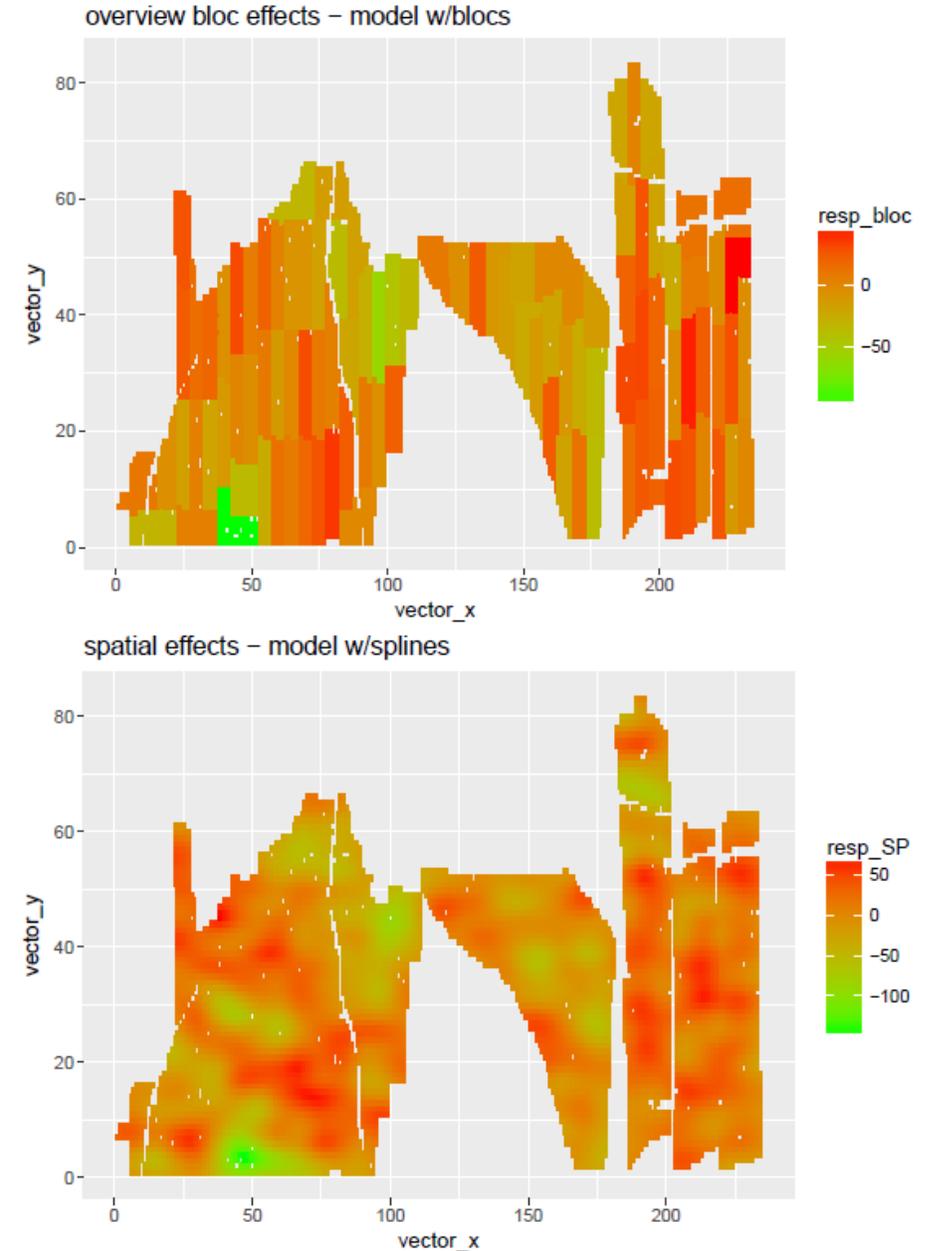


Figure 9: Pits excavated from Saint-Appolinaire (left and right) and position of the pits on the spatial effect map (center). The spatial effects are relative to the height in 2010 ('SA HT10'). 'BLUP' indicates that the spatial effects were estimated as best linear unbiased predictors. The scale indicates that a positive spatial effect on height was colored in green and a negative effect was colored in red.

Marchal 2017, thèse



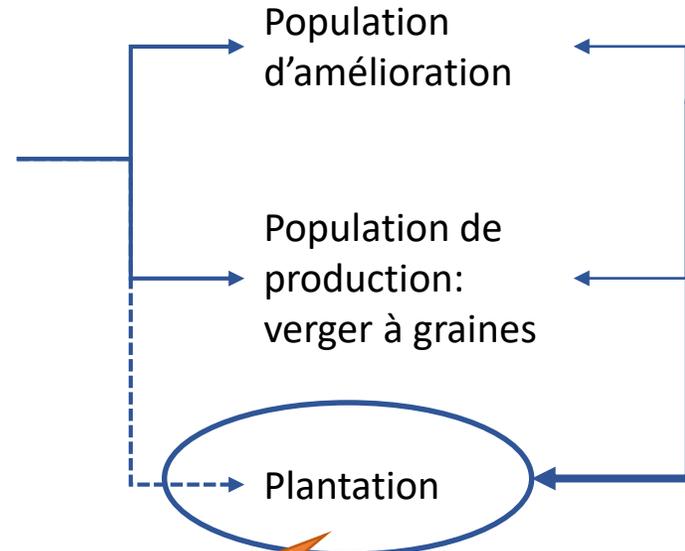
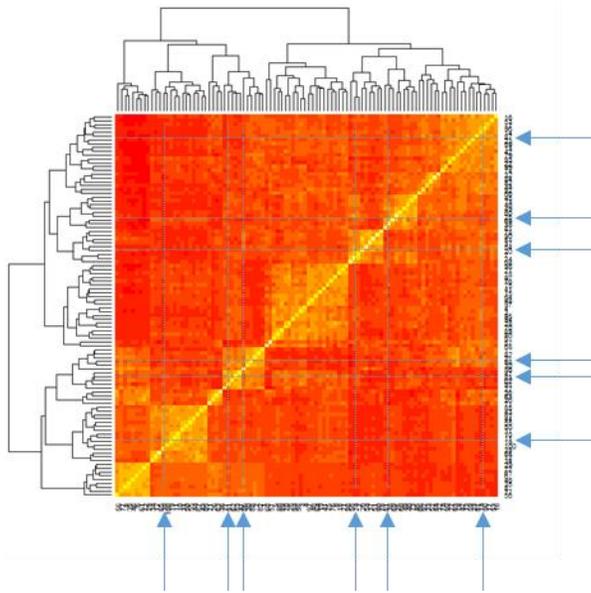
breedR outputs pour Douglas

Repenser la sélection,... la production, la plantation: sélection de groupe

Concept classique pour la diversité

Optimum contribution selection

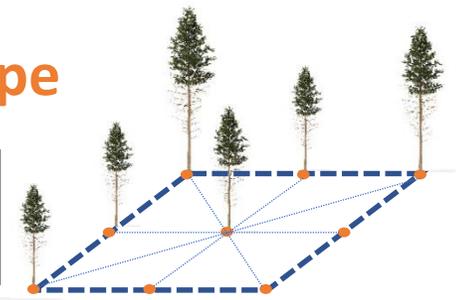
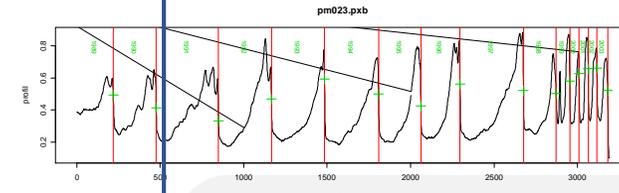
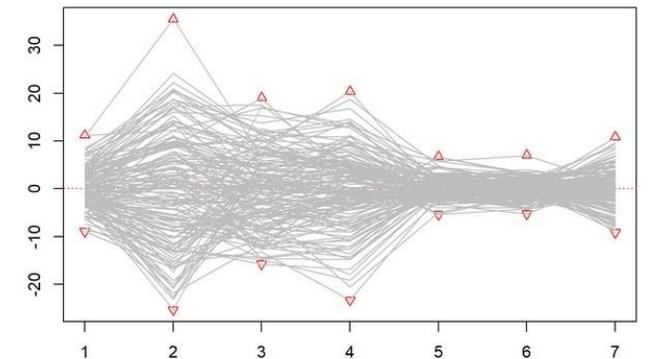
C_i = contributions of *selected* at time i
 $C_i'EBV_i$ = genetic gain at time $i + 1$
 $C_i'G_iC_i/2 = F$ at time $i + 1$
 $\text{Max}(C_i'EBV_i)$ at given increase in $C_i'G_iC_i$
 $\text{Min}(C_i'G_iC_i)$ at given levels of $C_i'EBV_i$



Challenges environnementaux et biotiques



Cocktail de résistances à la rouille



Compétition

Cappa et al. TGG. DOI. 10.1007/s11295-015-0917-3

Observed Phenotypes

Hidden Breeding Values

competition

direct

non-genetic components

Facilitation et multi-dimensionnalité du phénotypage

- Permettre l'approche systémique pour les caractères-fonction : numériser le phénomène
- Accélérer la caractérisation avec des mesures rapides, précises, plus facilement comparables et cumulables dans le temps et l'espace

Vers le phénotype systémique

- Développer une vision *systémique* dans l'étude des caractères, mieux comprendre le rôle des interactions GxE et les drivers environnementaux
- Asseoir une prédiction face aux changements environnementaux robuste et pertinente

Statistique spatiale

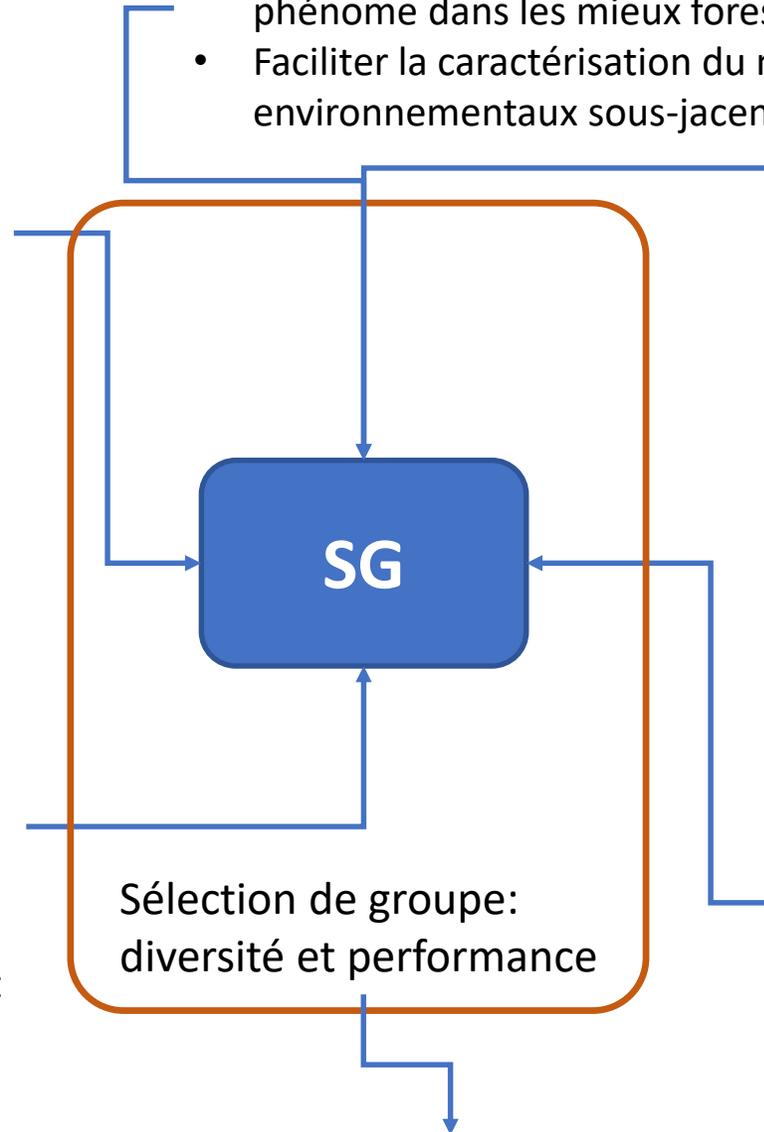
- Rendre plus facilement accessible et identifiable les signaux biologiques du phénomène dans les mieux forestiers
- Faciliter la caractérisation du milieu : identifier les facteurs micro-environnementaux sous-jacents au phénomène

Ressources génomiques pour génotypage et séquençage

- Apporter la « *matière de base* » pour expliquer les ressemblances phénotypiques : le « *gluant* » permettant l'intégration de données multiples, hétérogènes, dispersées, ...

Connaissance structure/architecture ~ pré-breeding

- Permettre une quantification de la diversité existante, distribution, rôle, risques
- Mobiliser les pools génétiques importants



- Accroître la résilience des productions face au milieu



*Bio*logie intégrée pour la
valorisation de la diversité des
Arbres et de la forêt



INRAE

