

“aRchi” une librairie R pour le traitement des QSM

Olivier Martin (Freelance) et Bastien Lecigne (Jakarta, UQAM)

Financement “3dformod” Raphaël Pelissier (UMR AMAP)

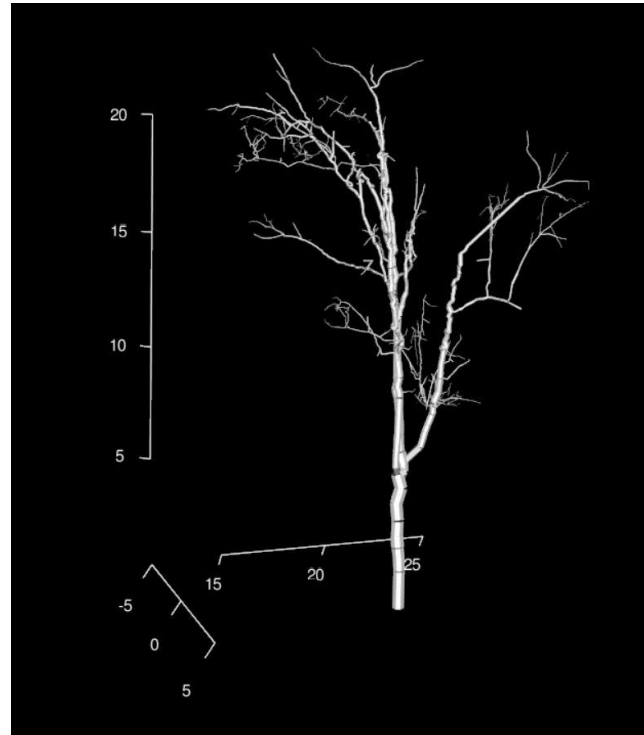
Qu'est ce qu'un QSM ?

- **Quantitative Structural Model**
- Une façon d'encoder la complexité 3D d'un arbre (système ramifié)
- Pour les architectes: MTGs (Multiscale Tree Graph) sont des QSMs
- Ça ressemble à ça:

	startX	startY	startZ	endX	endY	endZ	cyl_ID	parent_ID	extension_ID	radius_cyl	length	volume	axis_ID	segment_ID	node_ID	branching_order
1	4.251252	19.55566	0.6463551	4.428245	19.46596	2.253137	1	0	2	0.2469613	1.618988	0.3102068	1	8	0	0
2	4.428245	19.46596	2.253137	4.36779	19.45518	2.817959	2	1	3	0.2469613	0.5667142	0.1085855	1	8	0	0
3	4.36779	19.45518	2.817359	4.388404	19.38538	3.226643	3	2	4	0.254759	0.4149736	0.0846115	1	8	0	0
4	4.388404	19.38538	3.226643	4.330252	19.36465	3.683931	4	3	5	0.2750775	0.4605519	0.109481	1	8	0	0
5	4.330252	19.36465	3.683931	4.320972	19.38164	4.285218	5	4	6	0.258618	0.6014741	0.1263817	1	8	0	0
6	4.320972	19.38164	4.285218	4.075667	19.39705	4.955968	6	5	7	0.2652528	0.6883008	0.1521416	1	8	0	0
7	4.075667	19.39705	4.955968	4.123714	19.56616	5.593068	7	6	8	0.2717966	0.6608467	0.1533694	1	8	0	0
8	4.123714	19.56616	5.593068	4.092323	19.40306	6.173434	8	7	9	0.2717966	0.6007932	0.1394321	1	8	0	0
9	4.092323	19.40306	6.173434	4.052655	19.66874	6.251607	9	8	10	0.2717966	0.2177652	0.05053897	1	10	8	0
10	4.052655	19.66874	6.251607	4.03138	19.65193	6.582516	10	9	11	0.2234175	0.3320181	0.05206502	1	10	8	0
11	4.03138	19.65193	6.582516	4.047671	19.49722	7.0651	11	10	12	0.2497126	0.4896698	0.09592551	1	18	10	0
12	4.047671	19.49722	7.0651	4.014703	19.49986	7.340844	12	11	13	0.1920121	0.2768278	0.03206393	1	18	10	0
13	4.014703	19.49986	7.340844	3.985704	19.49107	7.773235	13	12	14	0.1711426	0.4334466	0.03988428	1	18	10	0
14	3.985704	19.49107	7.773235	3.957127	19.49135	8.20077	14	13	15	0.1726296	0.4284388	0.04011153	1	18	10	0
15	3.957127	19.49135	8.20077	3.932756	19.4619	8.580007	15	14	16	0.1701973	0.3811485	0.03468562	1	18	10	0
16	3.932756	19.4619	8.580007	3.917454	19.42469	8.884773	16	15	17	0.1707449	0.3073691	0.02815176	1	18	10	0
17	3.917454	19.42469	8.884773	3.895536	19.40644	9.156037	17	16	18	0.1706797	0.272697	0.02495709	1	18	10	0
18	3.895536	19.40644	9.156037	3.791111	19.33128	9.518718	18	17	19	0.1661361	0.3828625	0.03319867	1	18	10	0
19	3.791111	19.33128	9.518718	3.829375	19.38012	9.801367	19	18	20	0.1764586	0.2773103	0.02712699	1	31	18	0
20	3.829375	19.38012	9.801367	3.780798	19.37744	10.08599	20	19	21	0.1618611	0.2886088	0.02375442	1	31	18	0
21	3.780798	19.37744	10.08599	3.751922	19.3786	10.42073	21	20	22	0.1593927	0.3359239	0.0268119	1	31	18	0
22	3.751922	19.3786	10.42073	3.724768	19.38189	10.75736	22	21	23	0.1581325	0.3376534	0.02652548	1	31	18	0
23	3.724768	19.38189	10.75736	3.731805	19.38064	11.13461	23	22	24	0.1560402	0.3772397	0.02885627	1	31	18	0
24	3.731805	19.38064	11.13461	3.76462	19.37528	11.37655	24	23	25	0.1598128	0.2441685	0.01959127	1	31	18	0
25	3.76462	19.37528	11.37655	3.764824	19.34456	11.68158	25	24	26	0.1620432	0.3064088	0.02527626	1	31	18	0
26	3.764824	19.34456	11.68158	3.750292	19.33091	11.92278	26	25	27	0.1540433	0.2419208	0.01803469	1	31	18	0
27	3.750292	19.33091	11.92278	3.709267	19.30304	12.33221	27	26	28	0.1564623	0.4124177	0.03171806	1	31	18	0
28	3.709267	19.30304	12.33221	3.667521	19.29069	12.61663	28	27	29	0.1557974	0.2876936	0.02193817	1	31	18	0
29	3.667521	19.29069	12.61663	3.630275	19.26104	12.88302	29	28	30	0.1534648	0.270501	0.02001411	1	31	18	0
30	3.630275	19.26104	12.88302	3.557496	19.25778	13.07496	30	29	31	0.1629598	0.2046986	0.01707756	1	31	18	0
31	3.557496	19.25778	13.07496	3.315566	19.25679	13.27366	31	30	32	0.1587214	0.3041959	0.02407544	1	31	18	0
32	3.315566	19.25679	13.27366	3.371582	19.30927	13.45338	32	31	33	0.1525981	0.1565407	0.01145184	1	34	31	0
33	3.371582	19.30927	13.45338	3.336261	19.32127	13.7003	33	32	34	0.1107176	0.2495344	0.00609784	1	34	31	0
34	3.336261	19.32127	13.7003	3.251789	19.44217	13.98019	34	33	35	0.1153123	0.3155637	0.01318221	1	34	31	0
35	3.251789	19.44217	13.98019	3.295661	19.29171	14.37166	35	34	36	0.1223039	0.3923126	0.01843583	1	38	34	0
36	3.295661	19.29171	14.37166	3.204371	19.30352	14.63089	36	35	37	0.1206752	0.2726233	0.01247237	1	38	34	0
37	3.204371	19.30352	14.63089	3.15109	19.25428	14.84526	37	36	38	0.119963	0.2263026	0.01023138	1	38	34	0

Qu'est ce qu'un QSM ?

- **Quantitative Structural Model**
- Une façon d'encoder la complexité 3D d'un arbre (système ramifié)
- Pour les architectes: MTGs (Multiscale Tree Graph) sont des QSMs
- Ça ressemble à ça:



- Des cylindres connectés les uns aux autres

Comment obtenir un QSM ?

- En mesurant l'arbre à la main (Diamètres de branches; longueurs; angles)



Merlin Ramel (AMAP Montpellier)
Romain Lehnebach (ecofog Guyane)
Tropical Forest Cameroon



Olivier Martin
Tropical Forest Cameroon

Comment obtenir un QSM ?

- En mesurant l'arbre à la main (Diamètres de branches; longueurs; angles)
- En utilisant du LiDAR terrestre (TLS ou MLS) ou drone (moins approprié).



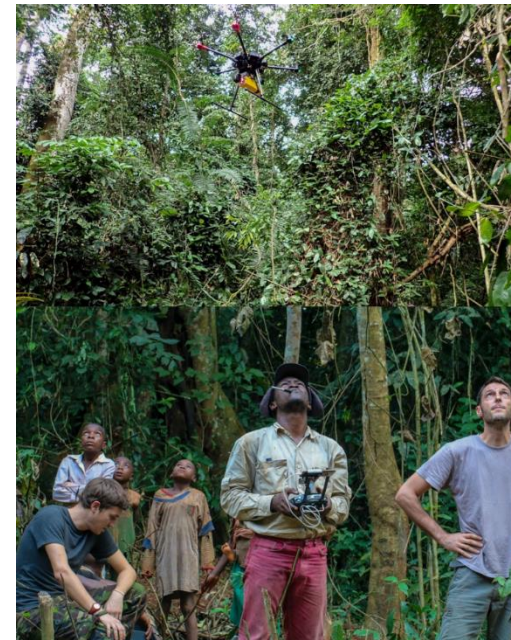
TLS

Stephane Momo Takoudjou (LaBosystE).
Tropical Forest Cameroon



MLS

Bastien Vandendaele (Usherbrooke, NHRI)
Temperate forest New Brunswick (Canada)

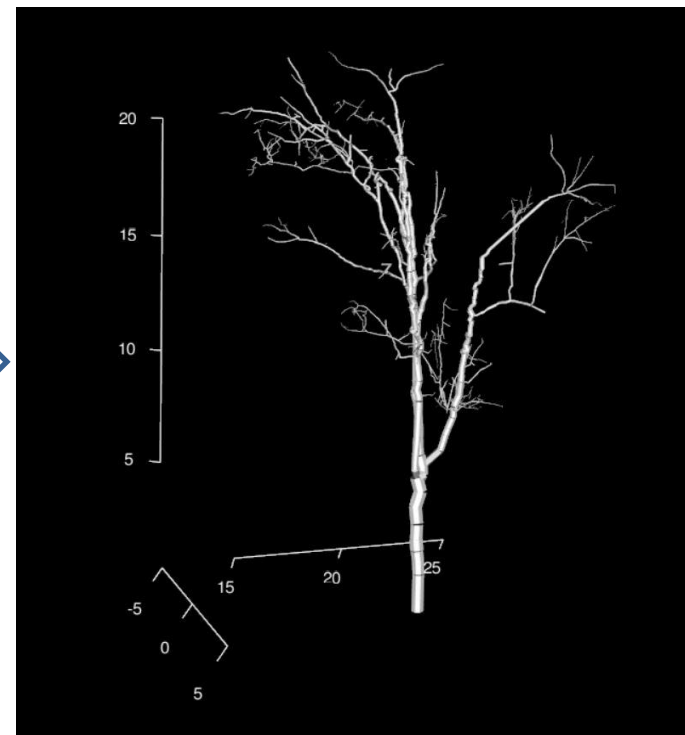
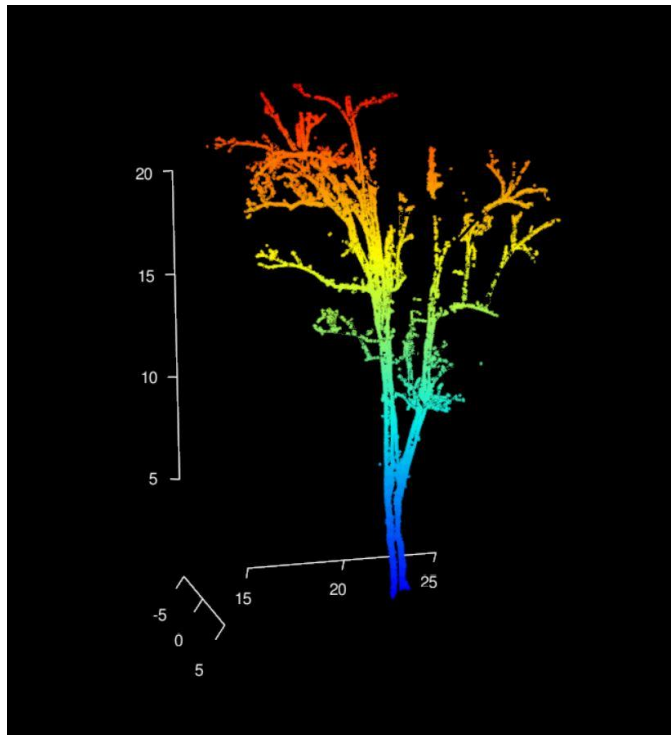


ULS

Lebienfaiteur Sagang (UCLA)
Nicolas Barbier (AMAP Montpellier)
Tropical Forest Cameroon

Comment obtenir un QSM ?

- En mesurant l'arbre à la main (Diamètres de branches; longueurs; angles)
- En utilisant du LiDAR terrestre (TLS ou MLS) ou drone (moins approprié).
 - Pour obtenir un nuage de point
 - Et calculer un QSM en utilisant un des algorithmes disponible



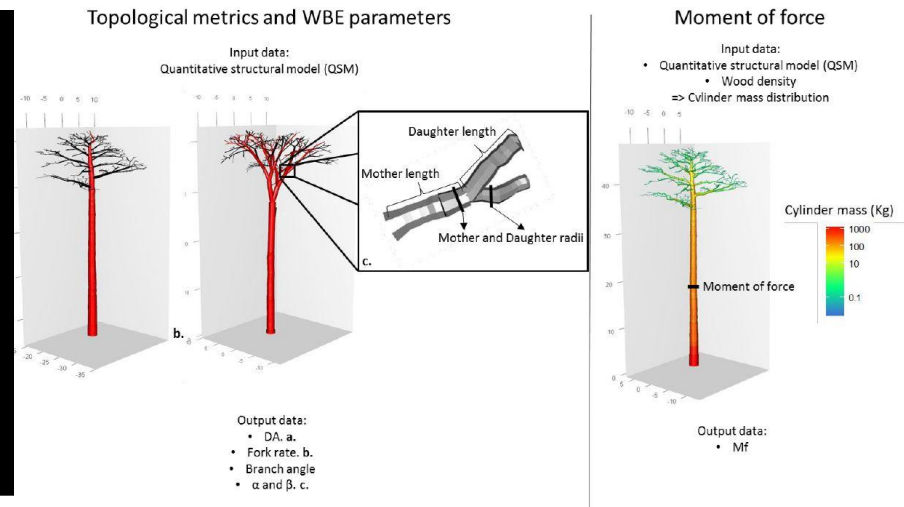
Comment obtenir un QSM ?

Plusieurs algorithmes existe:

- Simpletree/simpleforest. (Hackenberg et al 2015)
 - Computree
- Pypetree (Delagrangé, Jauvin, and Rochon 2014)
 - Standalone
- TreeQSM (Raumonen et al. 2013)
 - Matlab
- Plantscan3d. Frédéric Boudon (AGAP)
 - Standalone (Python. openalea Platform)
- adTree
 - Standalone (C++)
- ...
- **aRchi (Bastien Lecigne)**
 - **R**

Quel est l'objectif d'aRchi ?

- Générer des QSM
- Les visualiser, les manipuler, les modifier
- Calculer des variables d'intérêts en biologie/écologie de l'arbre (biomasse, volume de bois, architecture, exposants allométriques).
- Et plus encore....



La classe S4 aRchi

Une classe S4 ?

- Une classe S4 contient des “slots” (*i.e.*, tiroirs) et des “méthodes” (*i.e fonctions spécifiques*)
- Par exemple **LAS** du package **lidR** est une classe S4 qui représente le format **.las**

```
# Read a las/laz file
```

```
LASfile <- system.file("extdata", "Megaplot.laz", package="lidR")
```

```
las <- readLAS(LASfile)
```

```
las
```

```
## class : LAS (v1.2 format 1)
```

```
## memory : 6.2 Mb
```

```
## extent : 684766.4, 684993.3, 5017773, 5018007 (xmin, xmax, ymin, ymax)
```

```
## coord. ref. : NAD83 / UTM zone 17N
```

```
## area : 53112.69 m²
```

```
## points : 81.6 thousand points
```

```
las@data # slot data = the point cloud and more ...
```

```
##      X      Y      Z gpstime Intensity ReturnNumber NumberOfReturns
## 1: 684992.2 5018007 17.30 483825.9   41          1              1
## 2: 684992.6 5018006 17.03 483825.9   54          1              1
## 3: 684993.0 5018005 16.14 483825.9   51          1              2
```

La classe S4 aRchi

La classe aRchi est représentée par 6 “slots”

Class aRchi

QSM

Point Cloud

Leaves

Paths

Nodes

Operations

La classe S4 aRchi

La classe aRchi est représentée par 6 “slots”

Class aRchi

Slot: QSM

- Une table avec un format **standardisée dans R**
- Généré depuis un nuage de point: “slot” *point_cloud*
- **OU** d’un algo externe à R: TreeQSM (.txt ou .mat), Simpletree, pypetree...
Import avec la fonction `read_QSM()`

	startX	startY	startZ	endX	endY	endZ	cyl_ID	parent_ID	extension_ID	radius_cyl	length	volume	axis_ID	segment_ID	node_ID	branching_order
1	4.25	19.56	0.65	4.43	19.47	2.25	1	0	2	0.25	1.62	0.31	1	8	0	0
2	4.43	19.47	2.25	4.37	19.46	2.82	2	1	3	0.25	0.57	0.11	1	8	0	0
3	4.37	19.46	2.82	4.39	19.39	3.23	3	2	4	0.25	0.41	0.08	1	8	0	0
4	4.39	19.39	3.23	4.33	19.36	3.68	4	3	5	0.28	0.46	0.11	1	8	0	0
5	4.33	19.36	3.68	4.32	19.38	4.29	5	4	6	0.26	0.6	0.13	1	8	0	0
6	4.32	19.38	4.29	4.08	19.4	4.96	6	5	7	0.27	0.69	0.15	1	8	0	0
7	4.08	19.4	4.96	4.12	19.57	5.59	7	6	8	0.27	0.66	0.15	1	8	0	0
8	4.12	19.57	5.59	4.09	19.4	6.17	8	7	9	0.27	0.6	0.14	1	8	0	0

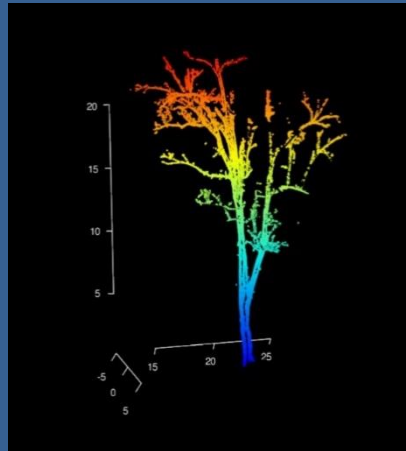
La classe S4 aRchi

La classe aRchi est représentée par 6 “slots”

Class aRchi

Slot: Point cloud

- Table X,Y,Z
- Pour produire un QSM.
- Pour représentation du nuage de point 3d.
- Formats acceptés: .las ou n'importe quel format ascii (.txt, .xyz. . .)



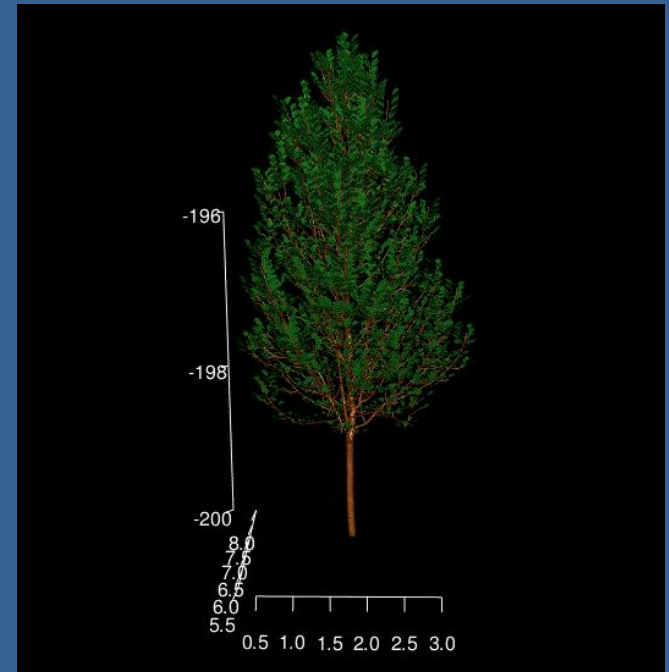
La classe S4 aRchi

La classe aRchi est représentée par 6 “slots”

Class aRchi

Slot: Leaves

- Liste à deux éléments:
 1. Mesh des feuilles
 2. Table des caractéristiques foliaires par pousse annuelle/axe
- Dépend du slot QSM.



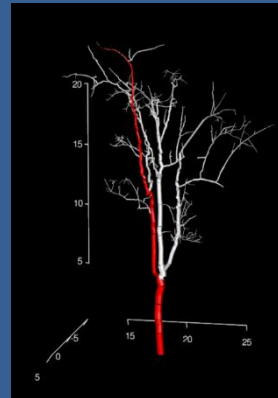
La classe S4 aRchi

La classe aRchi est représentée par 6 “slots”

Class aRchi

Slot: Path

- **Table** qui caractérise un autre niveau d’organisation. Le “Path” ou “Chemin”
- Dépend du slot QSM. Fonction: `Make_path()`
- Nécessaire à plusieurs fonction de la librairie aRchi



	startX	startY	startZ	endX	endY	endZ	cyl_ID	parent_ID	extension_ID	radius_cyl	length	volume	axis_ID	segment_ID	node_ID	branching_order	ID_Path
1	3.31	18.66	18.91	3.32	18.63	19.08	59	58	60	0.02	0.18	0	1	61	58	0	61
2	3.32	18.63	19.08	3.33	18.56	19.31	60	59	61	0.02	0.24	0	1	61	58	0	61
3	3.33	18.56	19.31	3.34	18.42	19.67	61	60	0	0.01	0.39	0	1	61	58	0	61
4	3.27	18.84	17.71	3.23	18.8	17.83	52	51	53	0.04	0.13	0	1	58	51	0	61
5	3.23	18.8	17.83	3.3	18.79	17.92	53	52	54	0.03	0.11	0	1	58	51	0	61

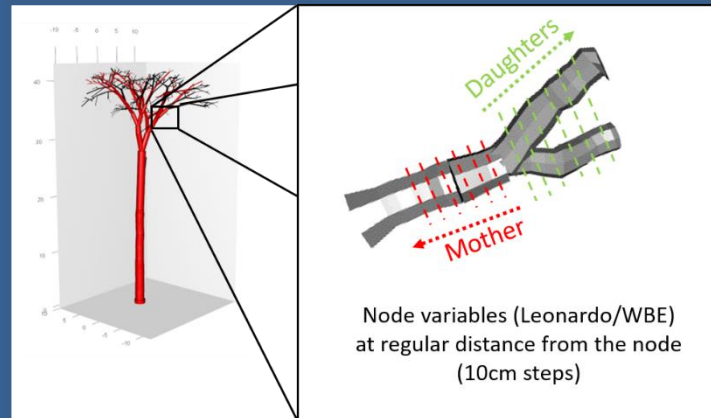
La classe S4 aRchi

La classe aRchi est représentée par 6 “slots”

Class aRchi

Slot: Nodes

- Liste de deux tables:
 1. Position relative
 2. Position absolue
- Dépend du slot QSM. Fonction: `Make_node()`
- Nécessaire pour métriques spécifiques à l'échelle du nœud. Paramètre WBE, ratio de Leonardo (Bentley et al. 2013; Lau et al. 2019; Martin-Ducup et al. 2020)



La classe S4 aRchi

La classe aRchi est représentée par 6 “slots”

Class aRchi

Slot: Operations

Certaines fonctions d’aRchi **modifient le QSM**. La slot “Operations” enregistre ces modifications et les paramètres associés.

Utilisation d'aRchi

La classe S4 aRchi

La classe aRchi est représentée par 6 “slots”

Class aRchi

QSM

Fonction
build_aRchi()

Paths

Nodes

Operations

Générer un QSM

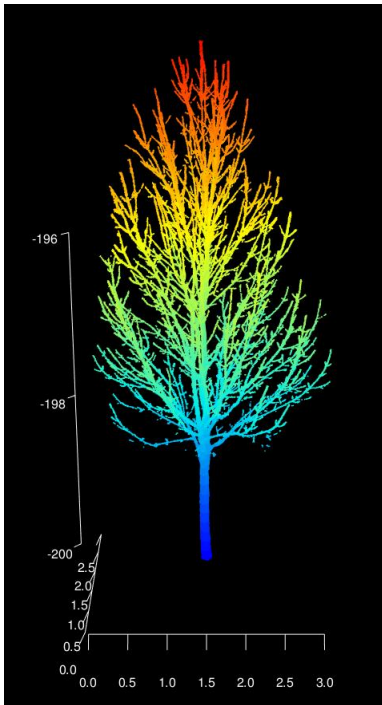
Bastien Lecigne

Fonctions: *skeletonize()*, *smooth_skeleton()* et *add_diameter()*

Applicable sur une classe aRchi contenant un nuage de point

Exemple code R:

```
My_aRchi <- build_aRchi(point_cloud=Mypointcloud)  
My_aRchi <- skeletonize(My_aRchi)  
My_aRchi <- smooth_skeleton(My_aRchi)  
My_aRchi <- add_radius(My_aRchi)
```



Générer un QSM

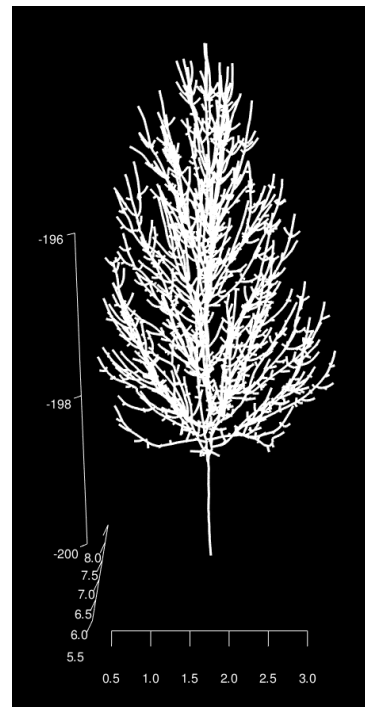
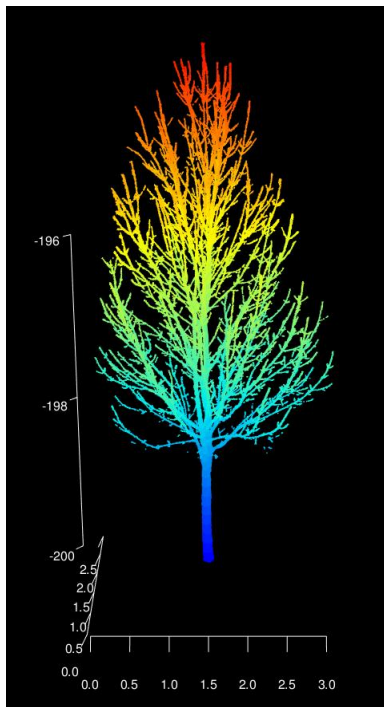
Bastien Lecigne

Fonctions: *skeletonize()*, *smooth_skeleton()* et *add_diameter()*

Applicable sur une classe aRchi contenant un nuage de point

Exemple code R:

```
My_aRchi <- build_aRchi(point_cloud=Mypointcloud)
My_aRchi <- skeletonize(My_aRchi)
My_aRchi <- smooth_skeleton(My_aRchi)
My_aRchi <- add_radius(My_aRchi)
```



Générer un QSM

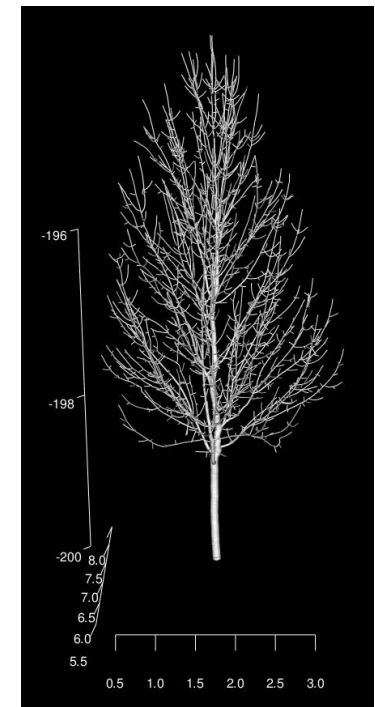
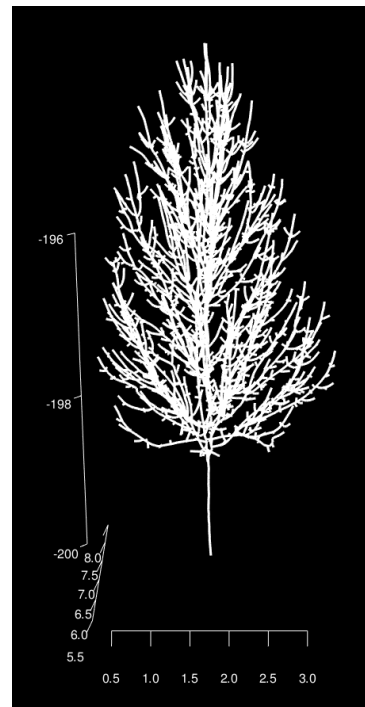
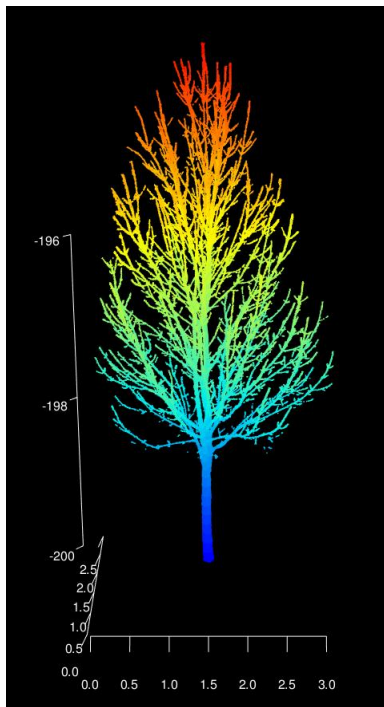
Bastien Lecigne

Fonctions: *skeletonize()*, *smooth_skeleton()* et *add_diameter()*

Applicable sur une classe aRchi contenant un nuage de point

Exemple code R:

```
My_aRchi <- build_aRchi(point_cloud=Mypointcloud)
My_aRchi <- skeletonize(My_aRchi)
My_aRchi <- smooth_skeleton(My_aRchi)
My_aRchi <- add_radius(My_aRchi)
```



Générer un QSM

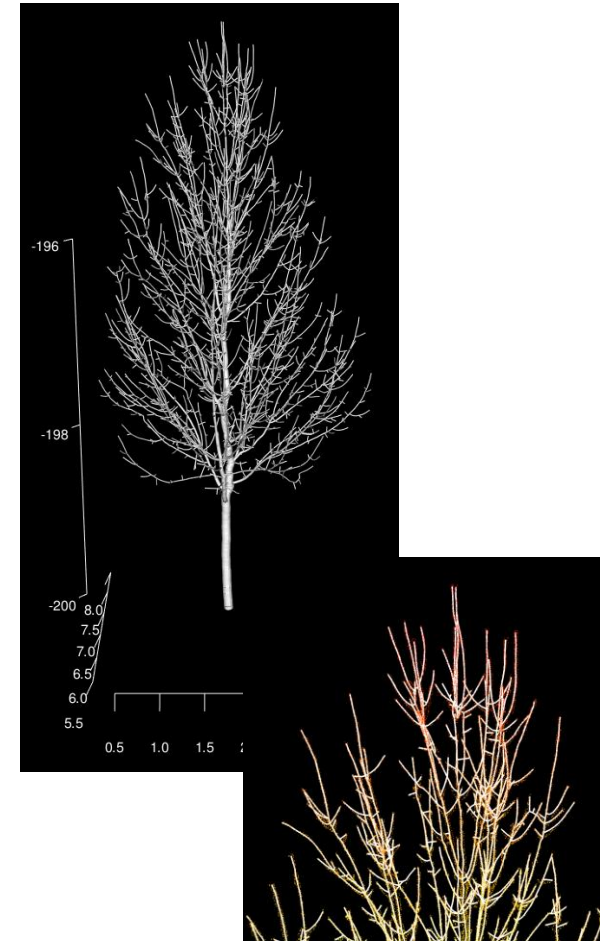
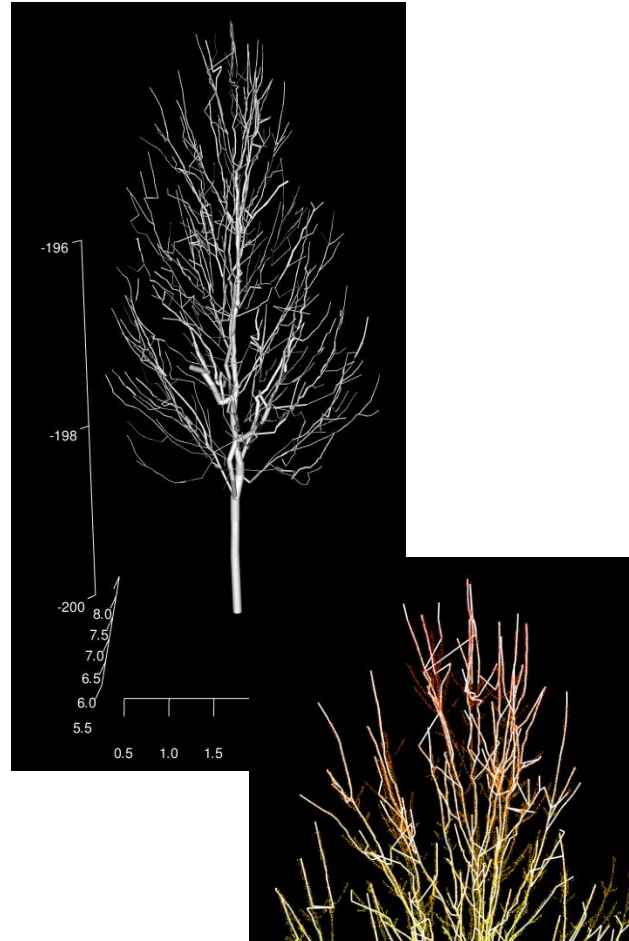
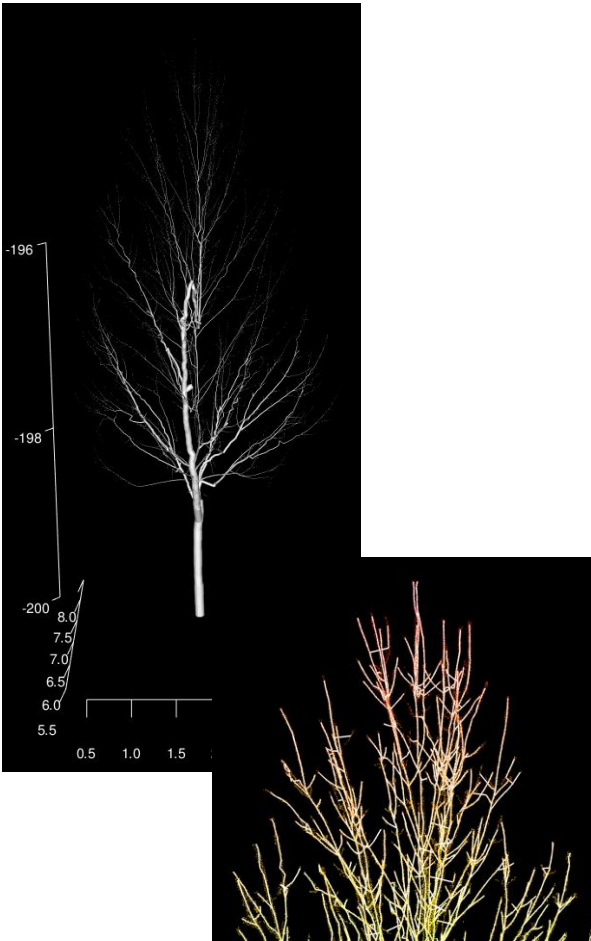
Bastien Lecigne

Génération de QSMs à haut niveau de détails

SimpleTree

TreeQSM

aRchi



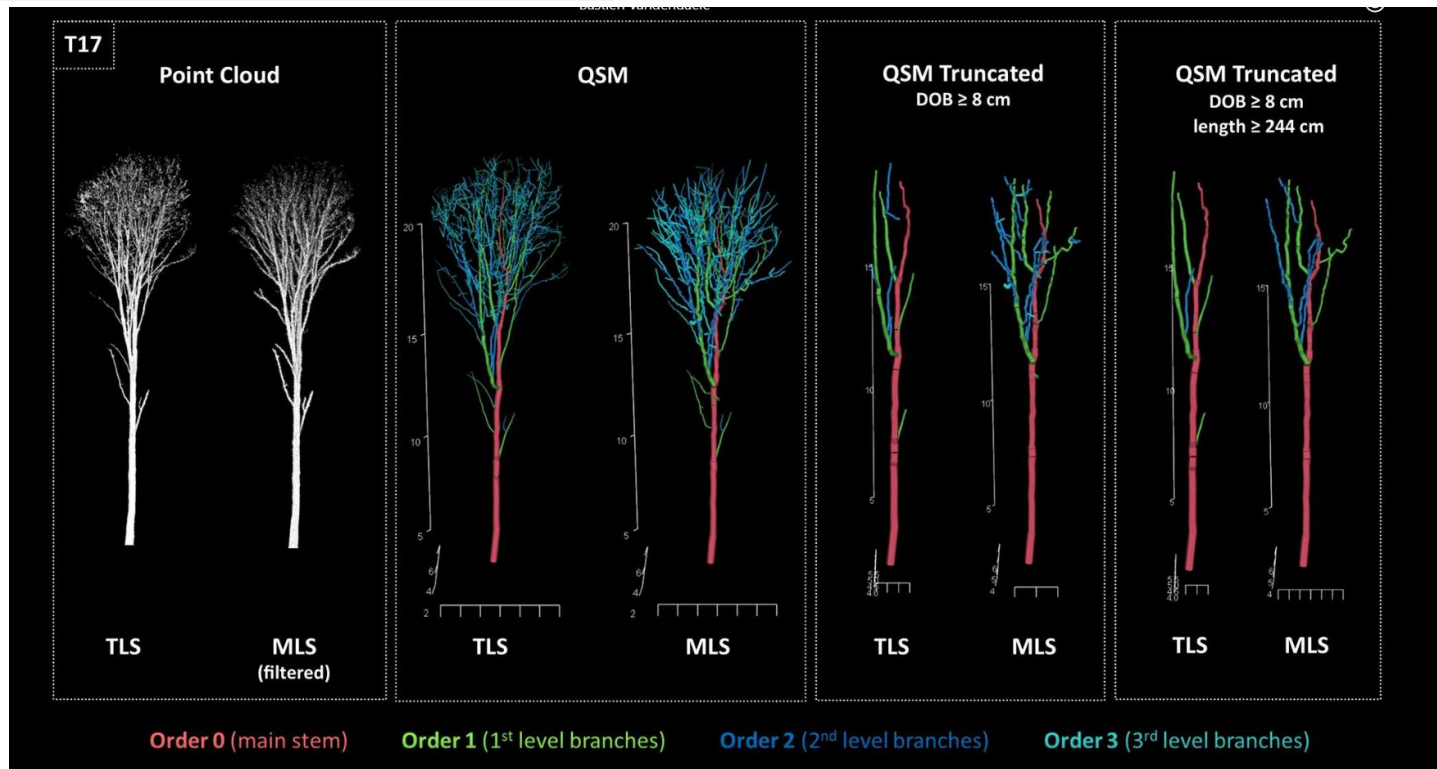
Modifier un QSM

Fonctions: *truncate_QSM()*, *clean_QSM*, *smooth_skeleton()*...

Applicable sur une classe aRchi contenant un QSM.

Exemple code R:

```
My_aRchi <- Make_path(My_aRchi)  
Mysubtree <- truncate_QSM(My_aRchi, threshold=0.04 )
```



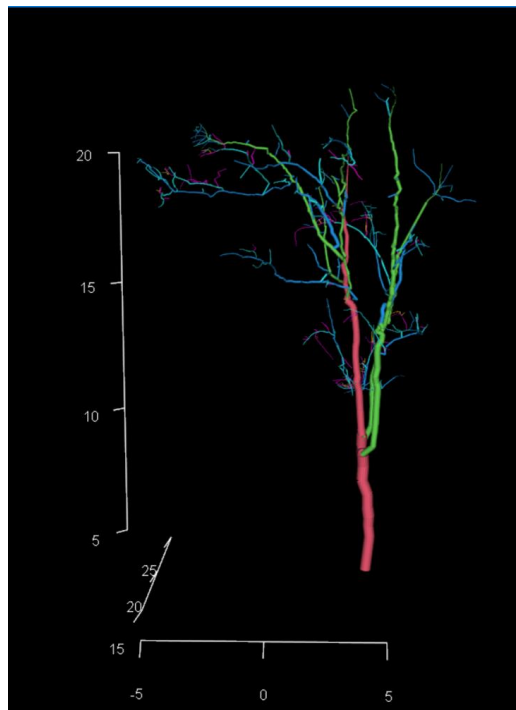
Visualiser et interagir avec un QSM

Fonctions: *plot()* et *selectinQSM_3d()*

Applicable sur une classe aRchi contenant un QSM.

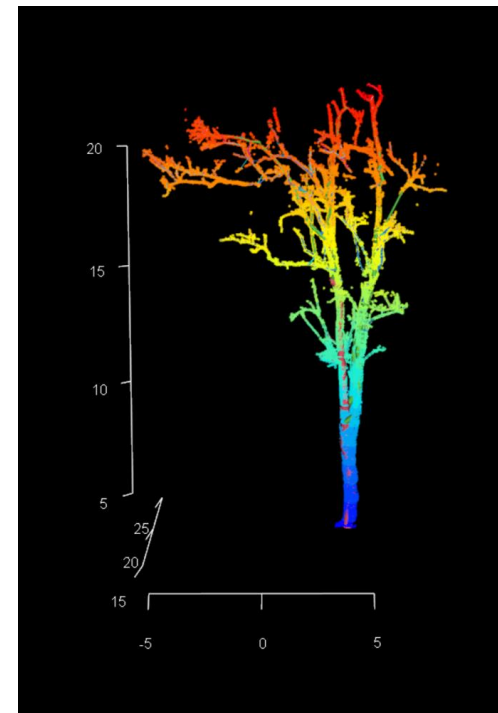
Exemple code R:

```
plot(My_aRchi , level="branching_order")
```



Exemple code R:

```
plot(My_aRchi , level="branching_order, show_point_cloud=TRUE)
```



Visualiser et interagir avec un QSM

Fonctions: *plot()* et *selectinQSM_3d()*

Applicable sur une classe aRchi contenant un QSM.

Exemple code R:

```
My_aRchi <- Make_path(My_aRchi)  
Mysubtree <- SelectinQSM_3d(My_aRchi, level="subtree")
```

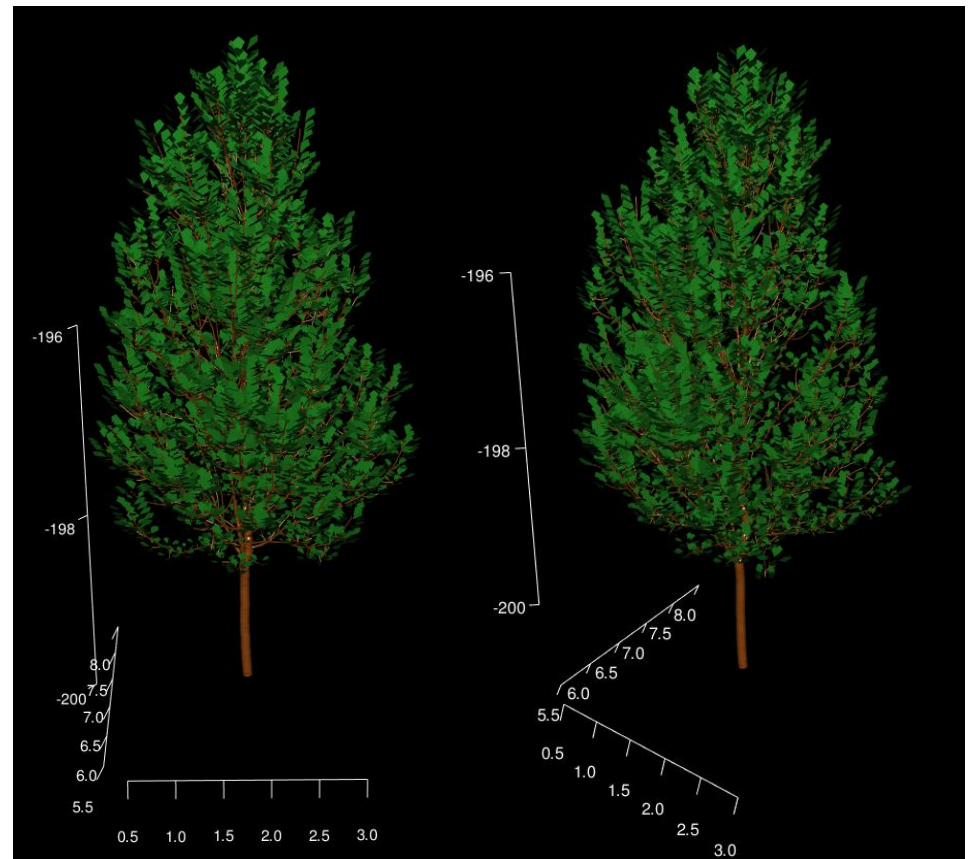
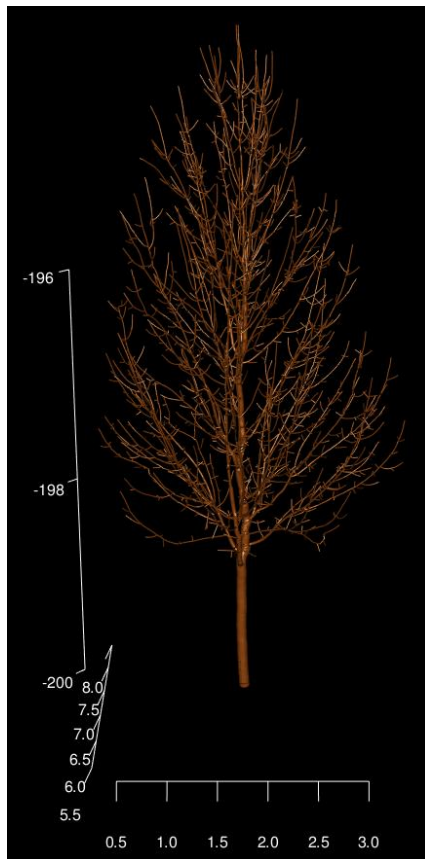


Reconstruction du feuillage

- Allométries + orientation des feuilles : `add_leaves()`

Exemple code R:

```
My_aRchi <- add_leaves(My_aRchi)
```



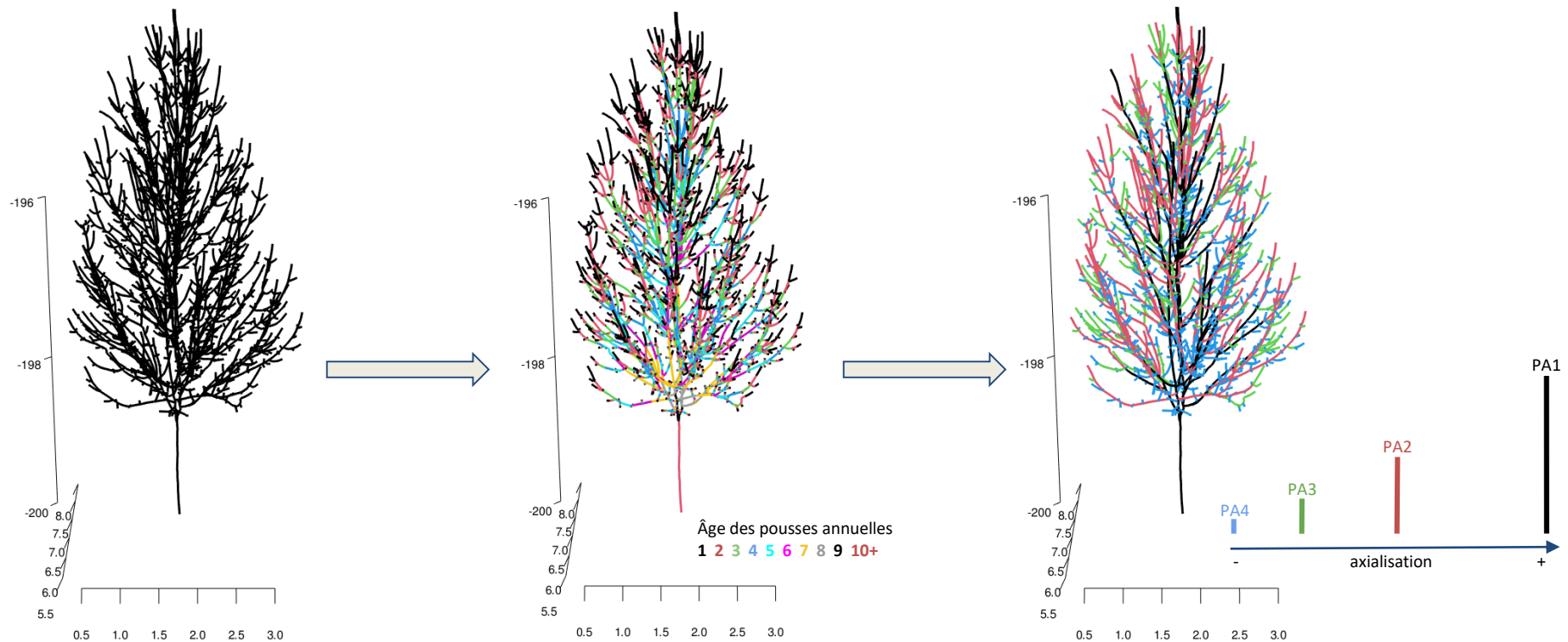
Lecigne B. et al. (2022)

Caractérisation d'élément architecturaux

- Segmentation des pousses annuelles: `segment_annual_shoots()`
- Déterminer l'âge physiologique des pousses: `add_physiological_ages()`

Exemple code R:

```
My_aRchi <- segment_annual_shoot(My_aRchi)  
My_aRchi <- add_physiological_ages(My_aRchi)
```



Métriques d'architecture fonctionnelle

Métriques d'architecture de l'arbre

Exemple code R:

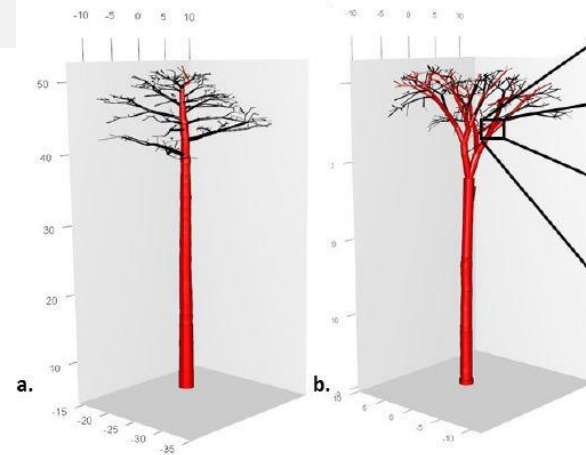
```
DAI(My_aRchi)  
Fork_rate(My_aRchi)  
PathFraction(My_aRchi)  
branchAngle(My_aRchi, level="tree") # finer level possible
```

For more information on the metrics see:

- Martin-Ducup et al 2020
- Bentley et al 2013
- Minamino and Tatenno 2014
- Smith et al 2014

Topological metrics

Input data:
Quantitative structural model (QSM)



Output data:

- DA. a.
- Fork rate. b.
- Branch angle

Métriques d'architecture fonctionnelle

Métriques basées sur l'élément "noeud"

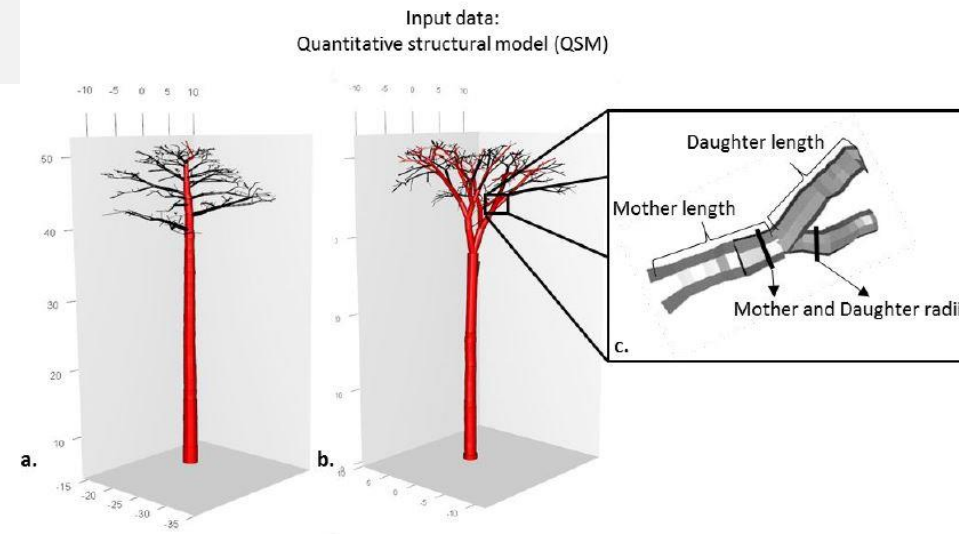
Exemple code R:

```
My_aRchi <- Make_node(My_aRchi)  
Leonardo_Ratio(My_aRchi, level = "tree" )  
WBEparameters(My_aRchi, level = "tree" )
```

For more information on the metrics see:

- Martin-Ducup et al 2020
- Bentley et al 2013
- Minamino and Tatenno 2014
- Smith et al 2014

Topological metrics and WBE parameters



Output data:

- DA. a.
- Fork rate. b.
- Branch angle
- α and β . c.

Métriques

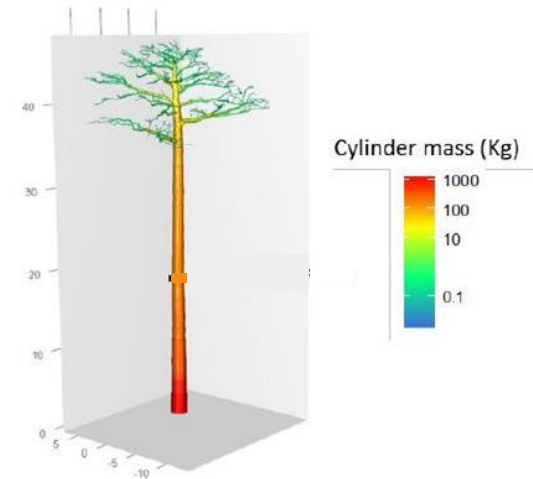
Volume/surface de bois et biomasse

Exemple code R:

```
Treevolume(My_aRchi, level="branching_order")  
woodSurface(My_aRchi, level="axis")  
TreeBiomass(My_aRchi, woodDensity=0.5, level="branching_order")
```

For more information on the metrics see:

- Martin-Ducup et al 2020
- Bentley et al 2013
- Minamino and Tateno 2014
- Smith et al 2014



Métriques

Volume/surface de bois et biomasse *Biomecanique*

Exemple code R:

```
TreecVolume(My_aRchi, level="branching_order")  
woodSurface(My_aRchi, level="axis")  
TreeBiomass(My_aRchi, woodDensity=0.5, level="branching_order")  
  
My_aRchi <- Compute_Mf(My_aRchi, WoodDensity=0.5)
```

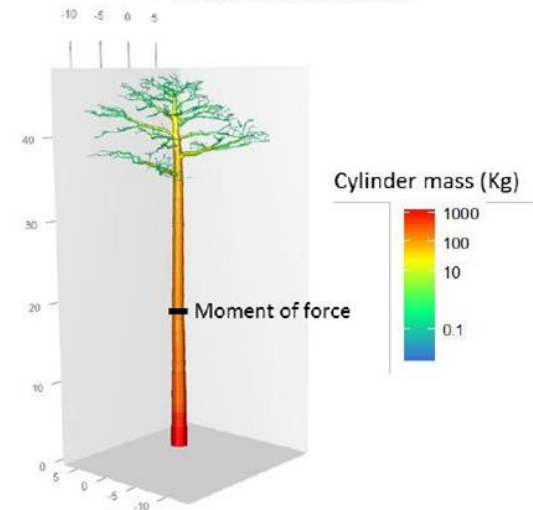
For more information on the metrics see:

- Martin-Ducup et al 2020
- Bentley et al 2013
- Minamino and Tateno 2014
- Smith et al 2014

Moment of force

Input data:

- Quantitative structural model (QSM)
 - Wood density
- => Cylinder mass distribution



Output data:

- Mf

Perspectives

Des idées pour aRchi 3.0

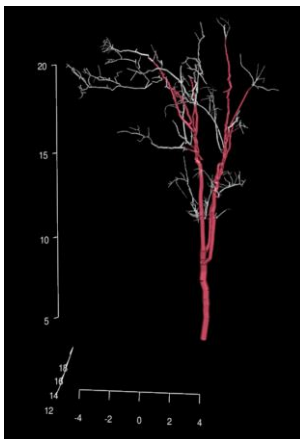
- Associé le package à **AMAPstudio scan** pour éditer les QSM
- Importer les **MTG** (Multiscale Tree Graph). Format → Plantscan3d
- Métriques nuages de points (Couronne, indices de compétition...)
- Indice de qualité des nuages de point (associé à **AMAPvox / Lvox**) et des QSMs
 - Indices d'occlusion pour ndp
 - Indices de distance ndp/QSM. RMSE cylindre..

Perspectives

Des idées pour aRchi 3.0

Dans certains contextes (reconstruction parcelle 1ha, écosystèmes tropicaux...) **les QSMs ne sont pas fiables** (occlusion, qualité du scan...)

Martin Ducup et al. 2021



Tree truncated below 10cm diameter

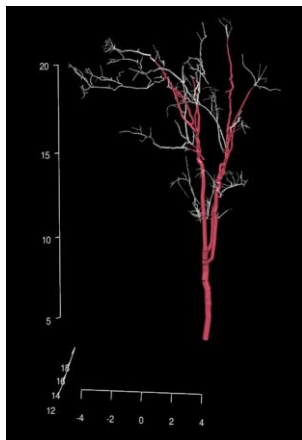
Perspectives

Des idées pour aRchi 3.0

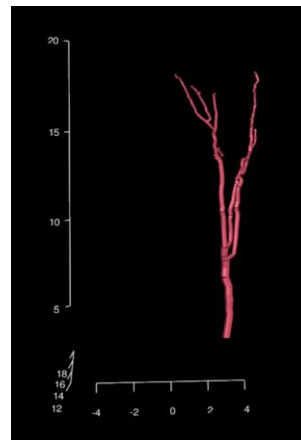
Dans certains contextes (reconstruction parcelle 1ha, écosystèmes tropicaux...) **les QSMs ne sont pas fiables** (occlusion, qualité du scan...)

Martin Ducup et al. 2021

Approche hybride entre **QSM sur les parties bien décrites**



Tree truncated below 10cm diameter



Reliable part

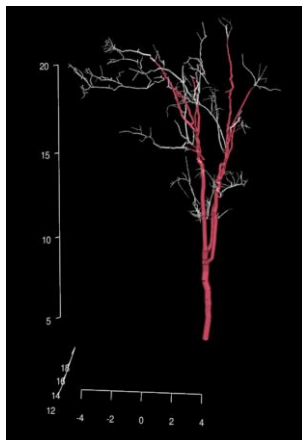
Perspectives

Des idées pour aRchi 3.0

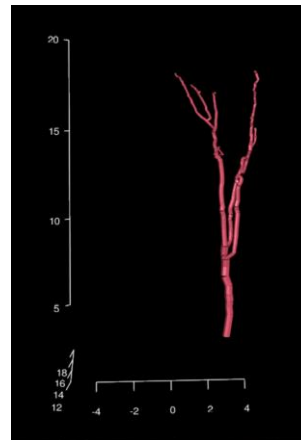
Dans certains contextes (reconstruction parcelle 1ha, écosystèmes tropicaux...) **les QSMs ne sont pas fiables** (occlusion, qualité du scan...)

Martin Ducup et al. 2021

Approche hybride entre **QSM sur les parties bien décrites** et **modélisation sur les parties mal décrites**



Tree truncated below 10cm diameter



Reliable part



Unreliable part inferred

Merci de votre attention !!

Reference:

- **Bentley LP, Stegen JC, Savage VM, et al. 2013.** An empirical assessment of tree branching networks and implications for plant allometric scaling models. *Ecology Letters* **16**: 1069–1078.
- **Lau A, Martius C, Bartholomeus H, et al. 2019.** Estimating architecture-based metabolic scaling exponents of tropical trees using terrestrial LiDAR and 3D modelling. *Forest Ecology and Management* **439**: 132–145.
- **Lecigne B, Delagrangé S, Taugourdeau O. 2021.** Annual Shoot Segmentation and Physiological Age Classification from TLS Data in Trees with Acrotonic Growth. *Forests* **12**: 391.
- **Lecigne, B., Delagrangé, S., Lauri, P. É., et Messier, C. 2022.** Trimming influences tree light interception and space exploration: contrasted responses of two cultivars of *Fraxinus pennsylvanica* at various scales of their architecture. *Trees*, 1-17.
- **Martin-Ducup O, Ploton P, Barbier N, et al. 2020.** Terrestrial laser scanning reveals convergence of tree architecture with increasingly dominant crown canopy position. *Functional Ecology* **34**: 2442–2452.
- **Minamino R, Tatenno M. 2014.** Tree branching: Leonardo da Vinci's rule versus biomechanical models. *PloS one* **9**: e93535.
- **Vandendaele B., Martin-Ducup O., et al. 2022** Mobile Laser Scanning for Estimating Tree Structural Attributes in Temperate Hardwood Forests. *Remote sensing*