

Les relations dose/effets en radiothérapie

Une solution par l'approche bayésienne

Paul Michaux

décembre 2025



GROUPE HOSPITALIER MUTUALISTE DE GRENOBLE

Clinique d'Alembert, Clinique des Eaux-Claires, Institut Daniel Hollard



MEMBER OF

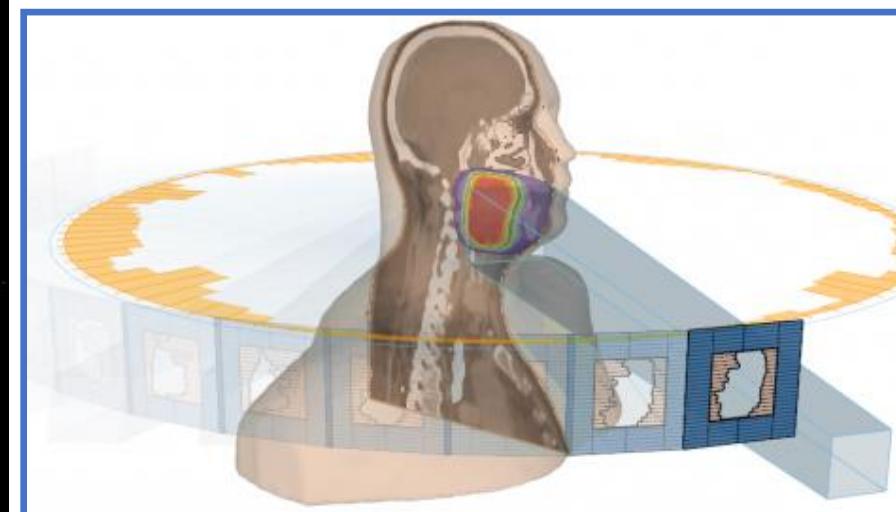
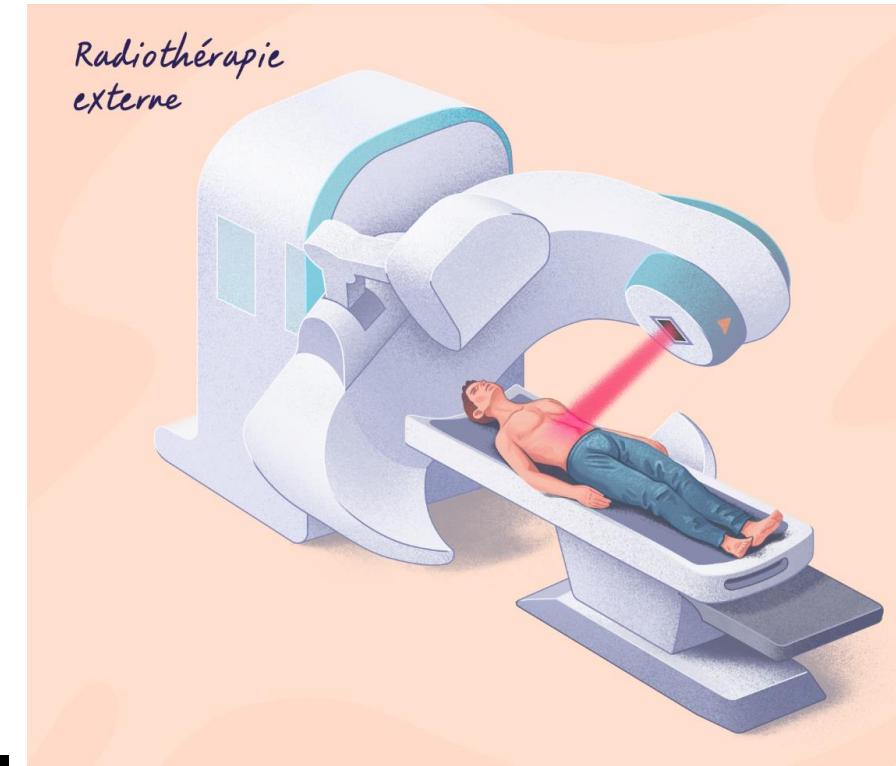
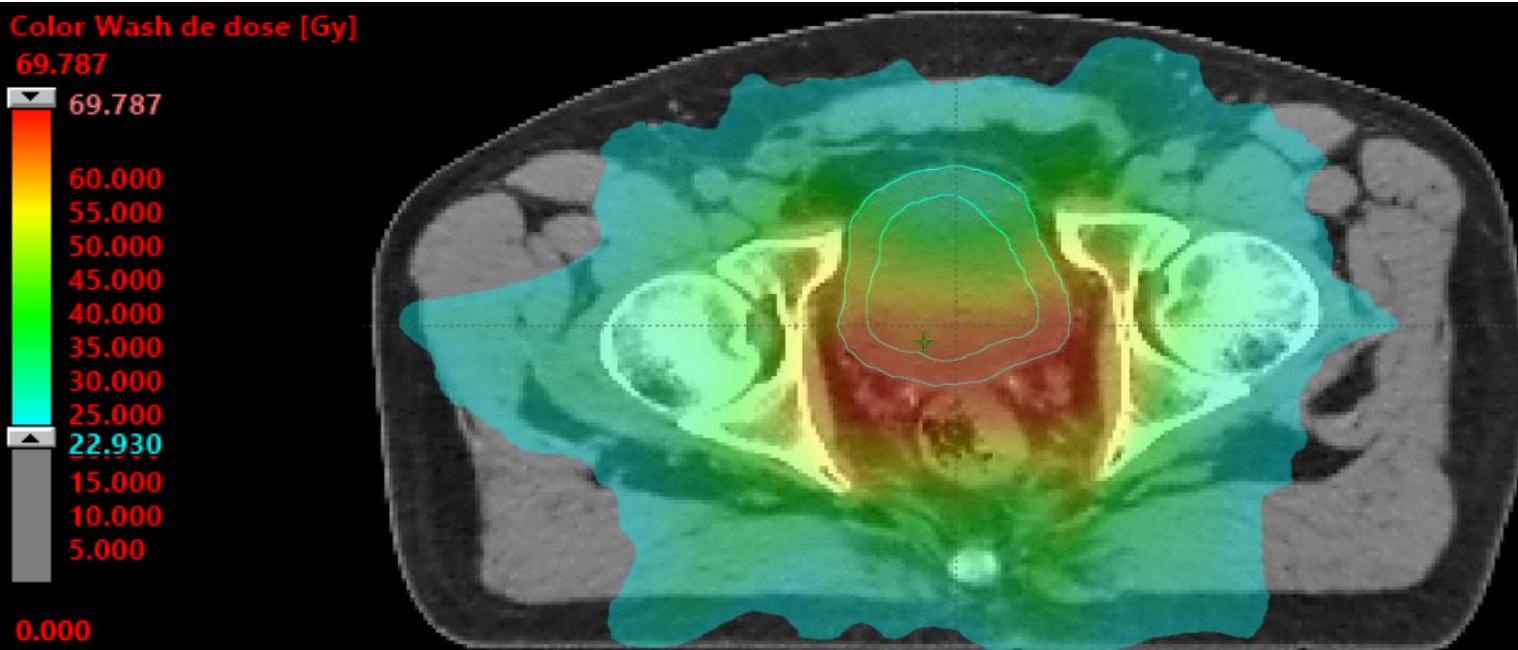


La Radiothérapie (RT)

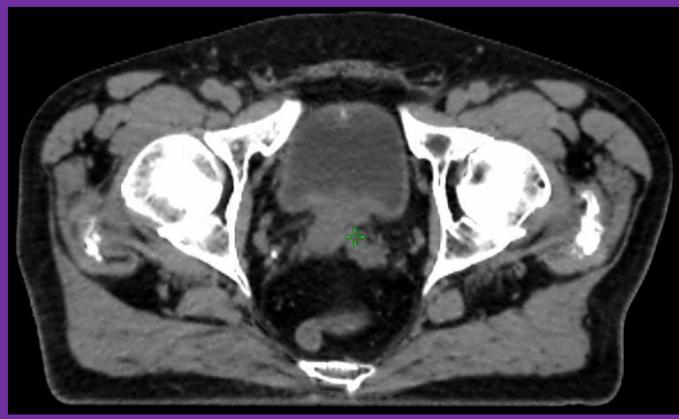
Des rayons-X administrés à un volume tumoral via un accélérateur linéaire.

L'énergie (Gy : J.kg⁻¹) en un point est appelée **dose**.

La **dose** dommage l'ADN et provoque la mort des tissus cellulaires.



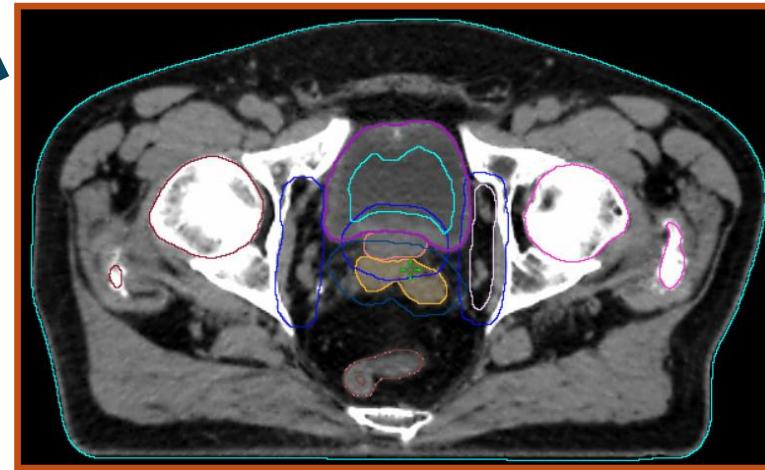
Contexte : la préparation au traitement



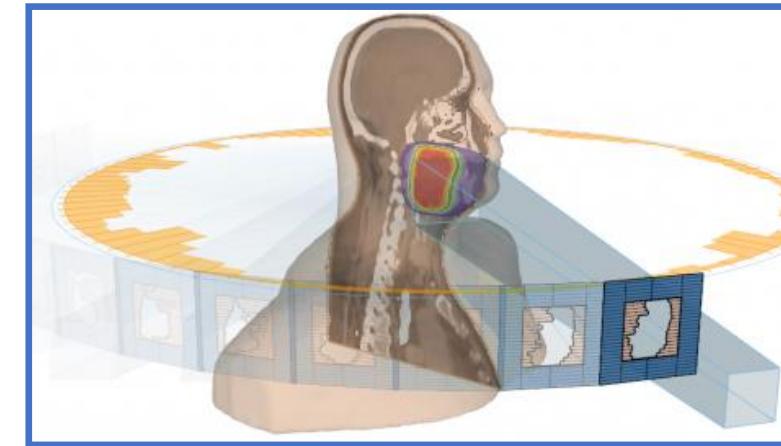
CT - Image



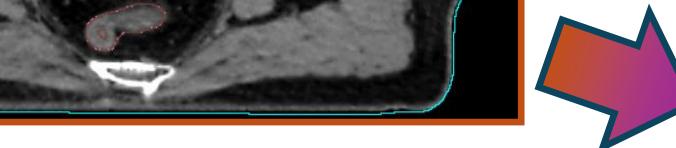
RT-Struct



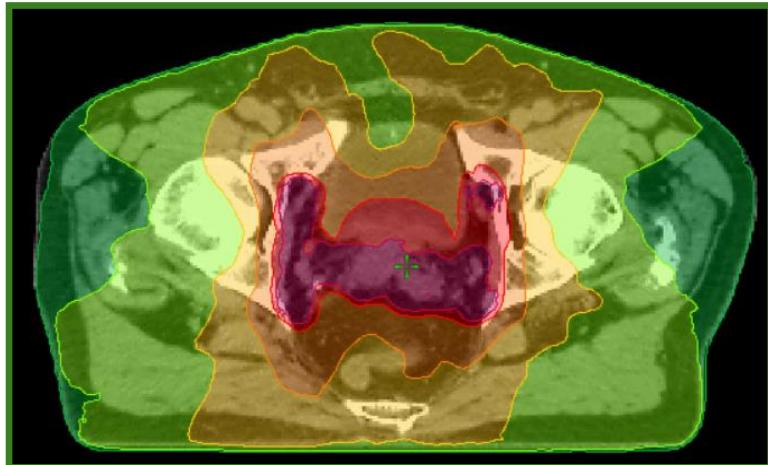
RT-Dose



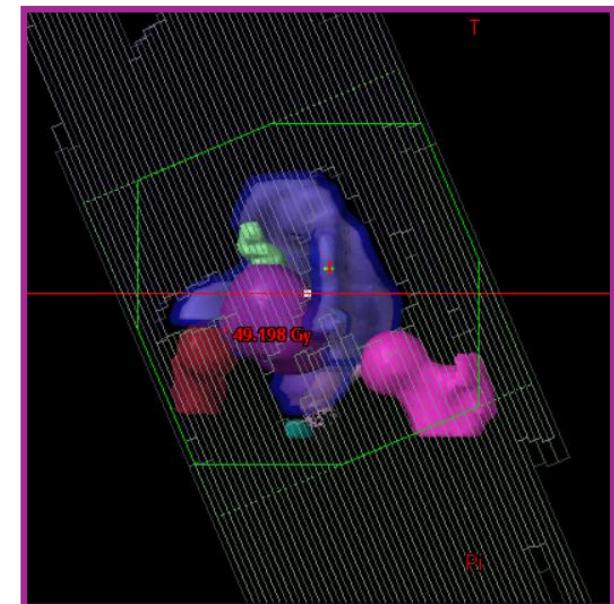
RT-Plan



Color Wash d'isodose [Gy]
48.300
48.000
✓ 46.000
44.200
✓ 43.700
✓ 30.000
✓ 20.000
✓ 10.000
✓ 5.000

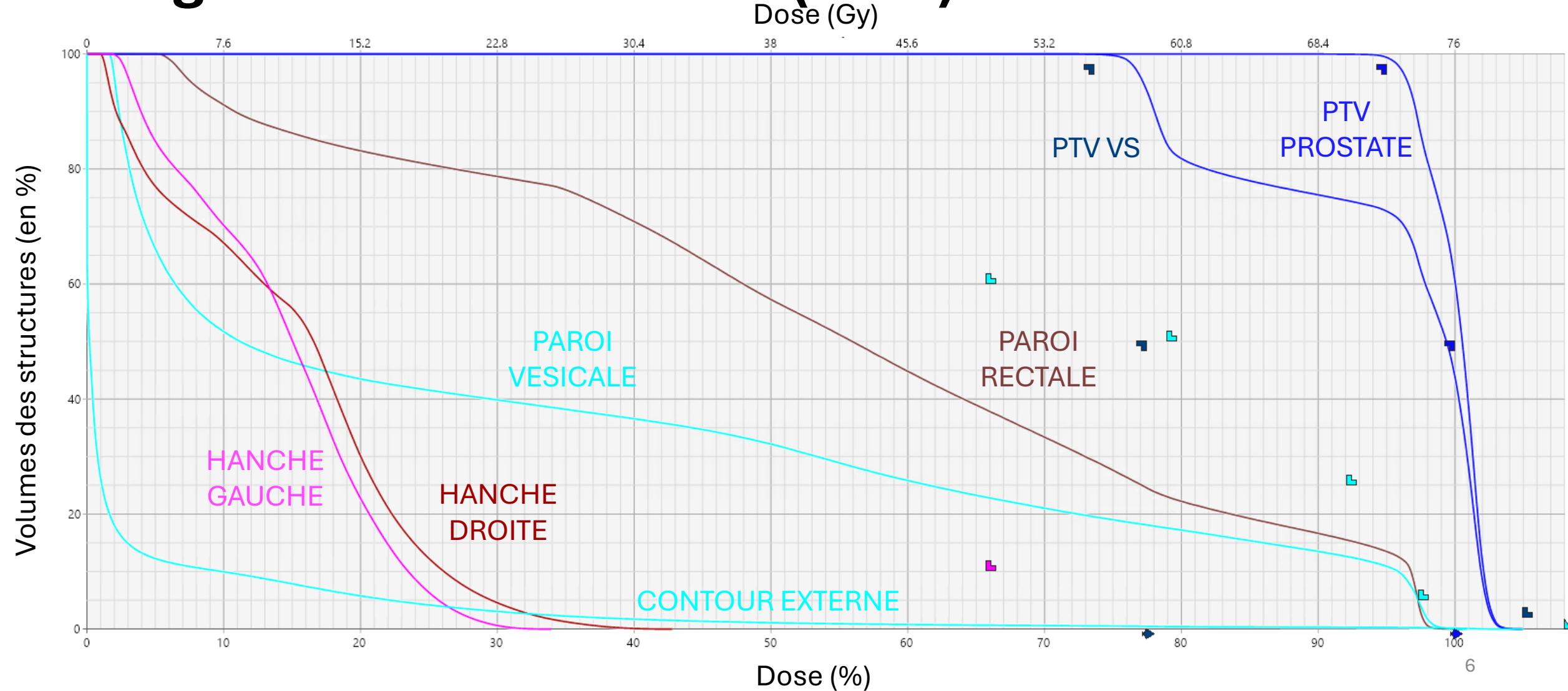


Histogramme Dose Volume
+
Objectifs cliniques

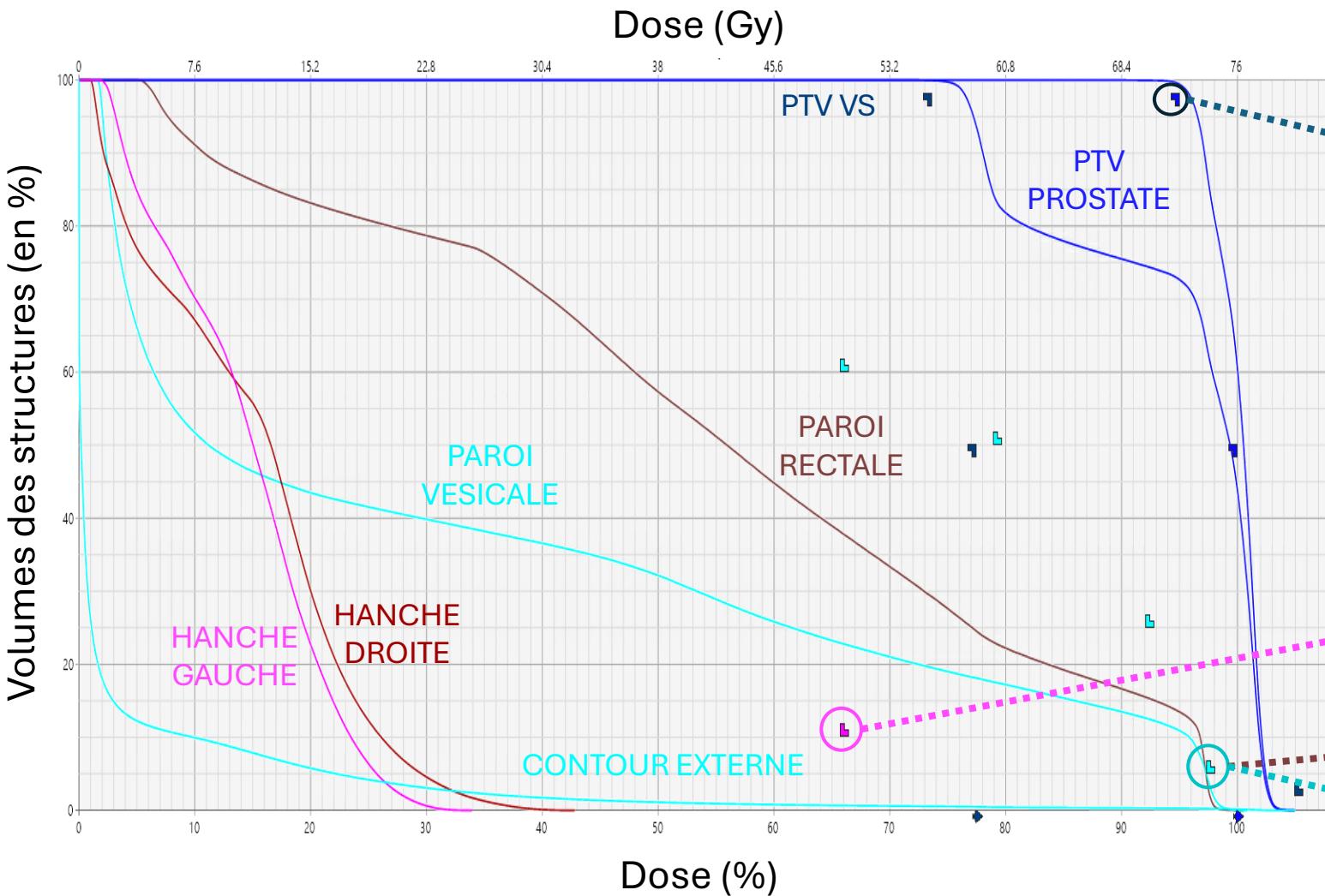


La validation du traitement :

<div[](https://www.radiologie-formation.com/medias/1000px-histogramme_dose-volume_HDV.png)



La validation du traitement



Plan		PROSTATE+VS
Dose totale		76.000 Gy
Récapitulatif des objectifs cliniques		0 0 19
PTV PROSTATE	P1	Dmoy \geq 76.00 Gy 76.03 Gy
	P1	D 98.0 % \geq 72.20 Gy 72.85 Gy
	P1	D 50.0 % \geq 76.00 Gy 76.40 Gy
	P1	D 2.0 % \leq 79.80 Gy 78.15 Gy
PTV VS	P1	Dmoy \geq 58.90 Gy 65.57 Gy
	P1	D 98.0 % \geq 55.95 Gy 57.64 Gy
	P1	D 50.0 % \geq 58.90 Gy 61.33 Gy
	P1	D 2.0 % \leq 79.80 Gy 77.75 Gy
CONTOUR EXTERNE	P1	Dmax \leq 108.0 % 105.02 %
HANCHE D	P1	V 50.00 Gy \leq 10.0 % 0.00 %
HANCHE G	P1	V 50.00 Gy \leq 10.0 % 0.00 %
PAROI RECTALE	P1	V 50.00 Gy \leq 60.0 % 38.07 %
	P1	V 60.00 Gy \leq 50.0 % 23.02 %
	P1	V 70.00 Gy \leq 25.0 % 15.49 %
	P1	V 74.00 Gy \leq 5.0 % 4.05 %
PAROI VESICALE	P1	V 50.00 Gy \leq 60.0 % 22.90 %
	P1	V 60.00 Gy \leq 50.0 % 17.58 %
	P1	V 70.00 Gy \leq 25.0 % 12.62 %
	P1	V 74.00 Gy \leq 5.0 % 4.71 %

ICRU : Commission Internationale des Unités et mesures Radiologiques
 SFRO : Société Française de Radiothérapie Oncologique
 RECORAD : Plateforme présentant des recommandations

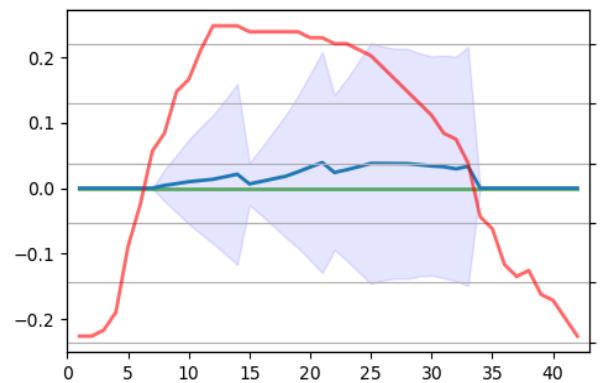
Recommandations sur les bonnes pratiques en traitement du cancer

Les effets radio-induits (toxicités/grades)

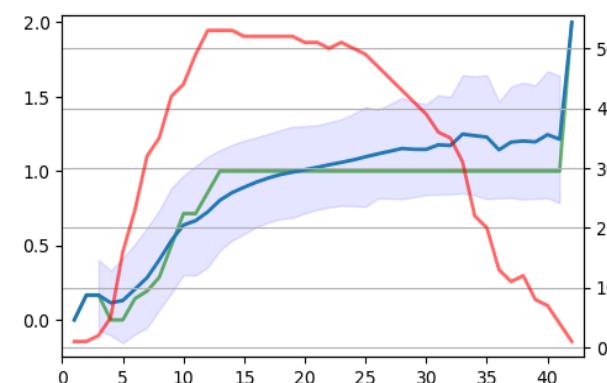
Basés sur des données issues du GHM

Traitement de cancer du sein
25 fractions de dose

Dysphagie



Dermite radique



Nombre de jours après le premier jour de traitement

Grade Médian
Grade Moyen
Écart-type
Nombre de Patientes

Grade	Effectifs
0	4
1	74
2	4

Grade de dermite radique après le 12^{ème} jour de traitement sur 82 (effectif) :

- Contrôle tumoral Ok
 - Grade 3-5 Ok (Échelle : 0-5)
 - Grade 0-2 ← manque d'explications
- ⇒ les modèles actuels n'expliquent pas s'il y aura toxicité ou non (grade 2 ici)

Objectifs cliniques	Plan		Σ - SEIND+BOOST
	Dose totale	N/A	
Récapitulatif des objectifs cliniques			
PTV_BOOST_D	P1	Dmoy \geq 60.00 Gy	60.69 Gy
	P1	D 95.0 % \geq 57.00 Gy	59.54 Gy
	P1	D 50.0 % \geq 60.00 Gy	60.63 Gy
	P1	D 2.0 % \leq 63.00 Gy	62.28 Gy
PTV_SEIN_D	P1	Dmoy \geq 50.00 Gy	52.17 Gy
	P1	D 95.0 % \geq 47.50 Gy	48.97 Gy
	P1	D 50.0 % \geq 50.00 Gy	51.20 Gy
	P1	D 2.0 % \leq 63.00 Gy	60.99 Gy
COEUR	P2	Dmoy \leq 2.00 Gy	0.82 Gy
CONTOUR_EXTERNE	P2	Dmax $<$ 64.80 Gy	62.84 Gy
POUMON_D	P2	Dmoy \leq 10.00 Gy	2.51 Gy
	P2	V 20.00 Gy \leq 30.0 %	1.14 %
	P2	V 30.00 Gy \leq 20.0 %	0.15 %
	P2	V 20.00 Gy \leq 18.0 %	1.14 %
SEIN_CONTROLAT	P2	Dmoy \leq 1.00 Gy	0.35 Gy
	P2	Dmax \leq 10.00 Gy	4.59 Gy

Méthodes pour définir les contraintes HDV

- Cohorte de plusieurs dizaines de patients
- Étude d'un organe

Les données cliniques et les effets toxiques (qualitatives)

Données cliniques :

- **Patient**
 - comorbidités,
 - âge,
 - radiosensibilité,
- **Prescription**
 - fractionnement,
 - étalement,
 - PTVs,
- **Traitements**
 - machine,
 - algo. de calculs,
 - toxicités,

Aperçu questionnaire

Titre 1ère CS SEIN

Type Clinique

DIABETE

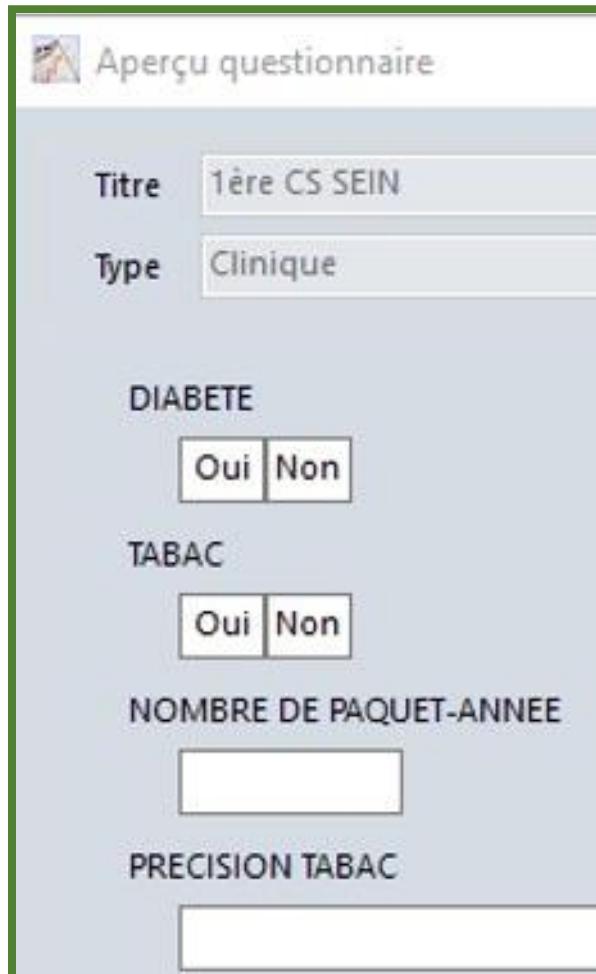
Oui Non

TABAC

Oui Non

NOMBRE DE PAQUET-ANNEE

PRECISION TABAC



Aperçu questionnaire

Titre TOXICITES SEIN

Type Clinique

DERMITE RADIQUE

G0 G1 G2 G3 G4 G5

OEDEME LOCALISE

G0 G1 G2 G3 G4 G5

PRURIT

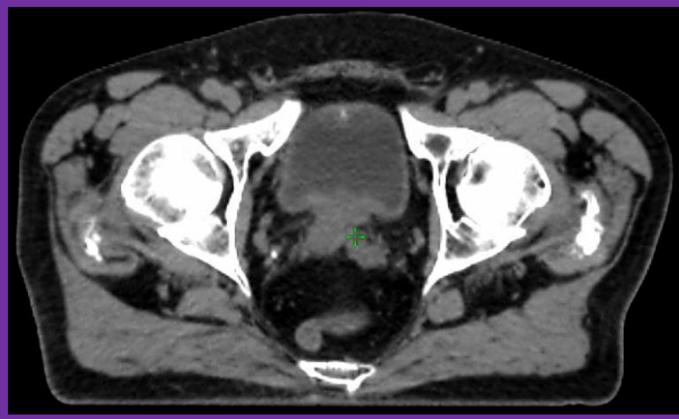
G0 G1 G2 G3 G4 G5

DOULEUR MAMMAIRE

G0 G1 G2 G3 G4 G5



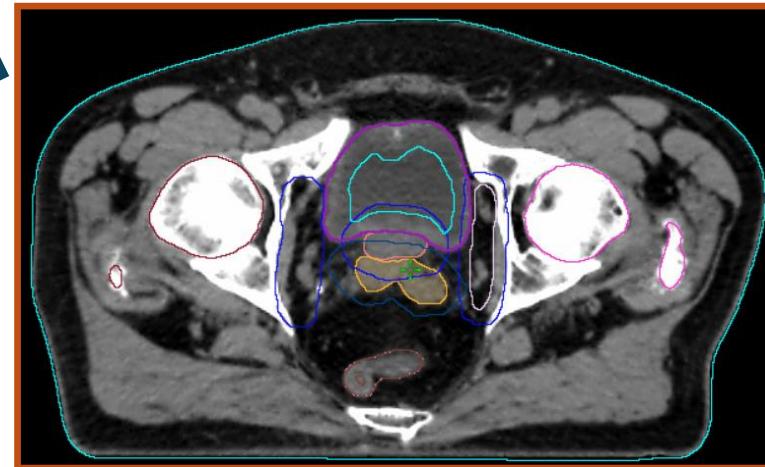
Les données techniques exhaustives (quantitative)



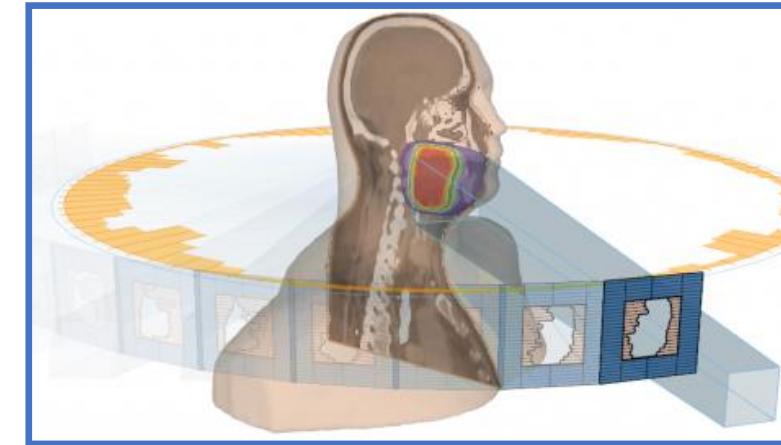
CT - Image



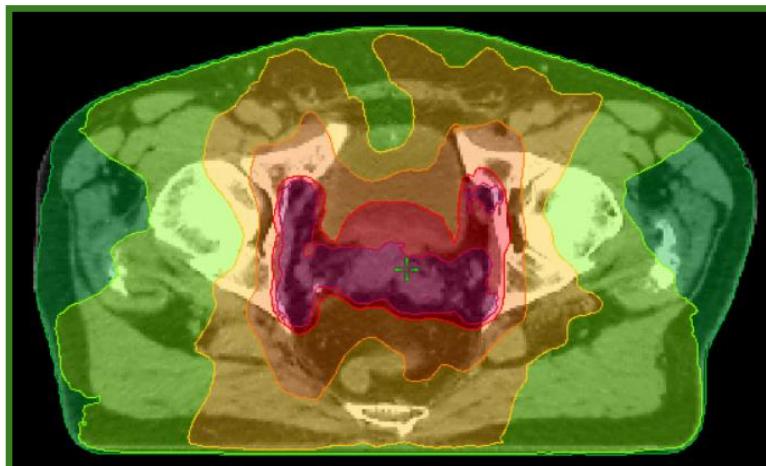
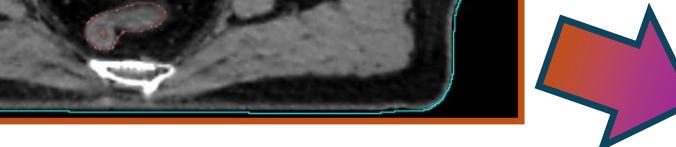
RT-Struct



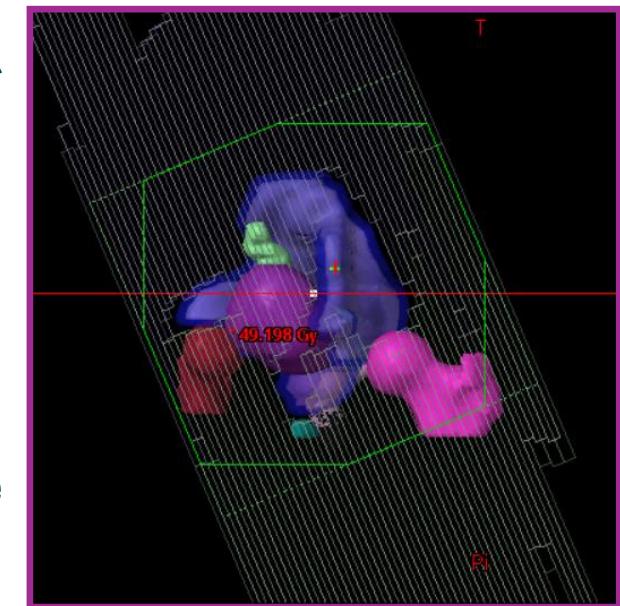
RT-Dose



RT-Plan



Histogramme Dose Volume
+
Objectifs cliniques

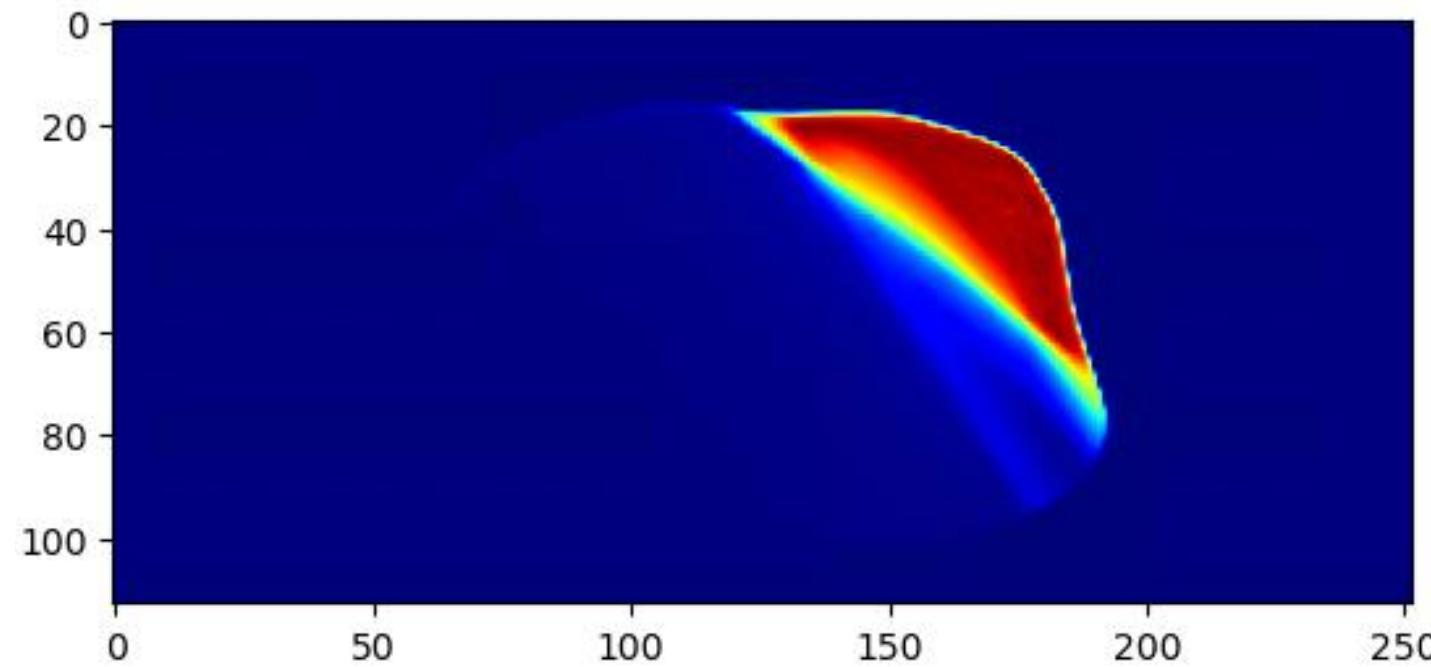


Exhaustives mais non-structurées et à très haute dimensionnalité.

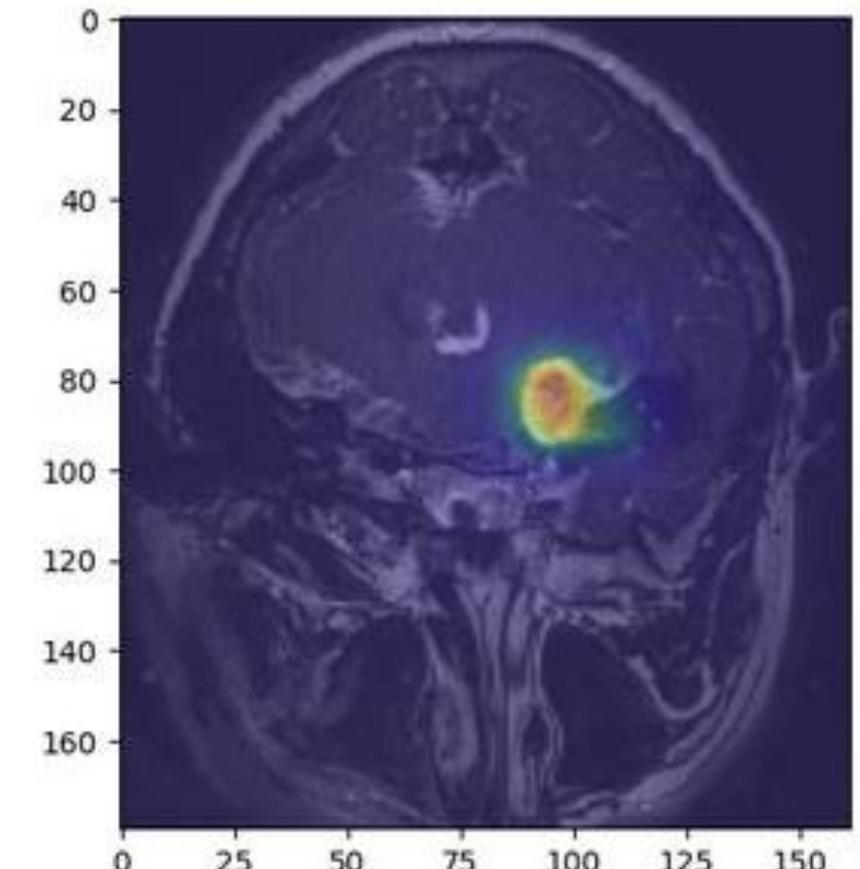
2 exemples :

Dimensions d'une matrice de dose.

Cancer du sein : $120 \times 255 \times 190$ voxels



Dimensions d'une matrice de dose.
Glioblastome : $178 \times 156 \times 172$ voxels



Quel est l'objectif que nous souhaitons atteindre ?

Modéliser plus finement les relations dose/effets permettrait :

- 1. d'identifier des indicateurs plus précis que les seuils de validité utilisés dans les pratiques actuelles,**
- 2. de les communiquer aux professionnels de santé,**
- 3. que les professionnels de santé les utilisent dans leurs pratiques quotidiennes au-delà du respect des seuils de validité.**

Tout en assurant que ces indicateurs n'altèrent pas la validité du traitement.

Comment concrétiser cet objectif ?

Bien que l'objectif semble assez direct, les éléments de sa réussite ne le sont pas tant que cela.

1. Les professionnels de santé n'accepteront de modifier leur pratique qu'à partir du moment où ils seront convaincus.

➤ Il faut alors que le format proposé convienne à leurs pratiques et à leur manière de penser.

2. Un simple modèle prédictif des effets toxiques ne peut pas suffire.

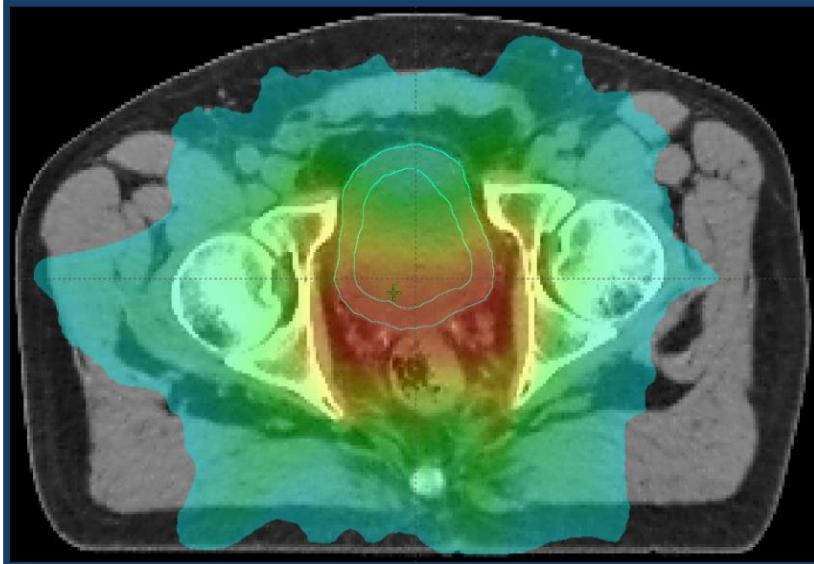
Il faut pouvoir fournir également des indicateurs renseignant sur les alternatives minimisant ces complications.

➤ Il faut un modèle ayant la flexibilité de renseigner les praticiens sur :

1. les effets toxiques possibles selon un patient et un traitement,
2. l'adaptation du traitement selon un patient et comment éviter les effets toxiques.

Données techniques

Physiciens
+
Dosimétristes



Structuration et
synthèse des
données techniques

Model A

Données cliniques structurées

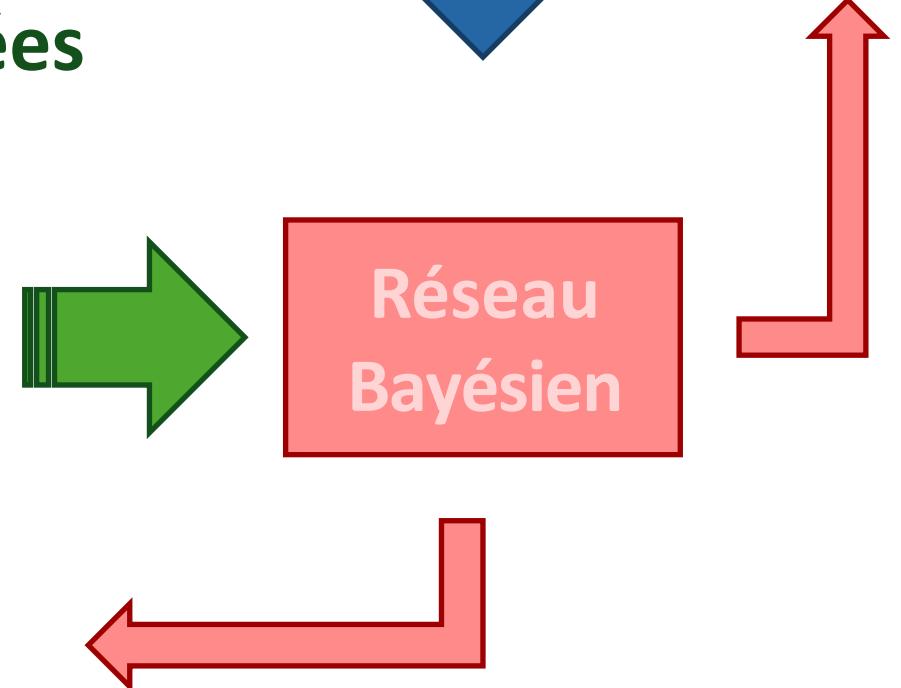
Radio-
thérapeutes

Aperçu questionnaire

Titre	1ère CS SEIN
Type	Clinique
DIABÈTE	
Oui	Non
TABAC	
Oui	Non
NOMBRE DE PAQUET-ANNEE	
PRECISION TABAC	

Aperçu questionnaire

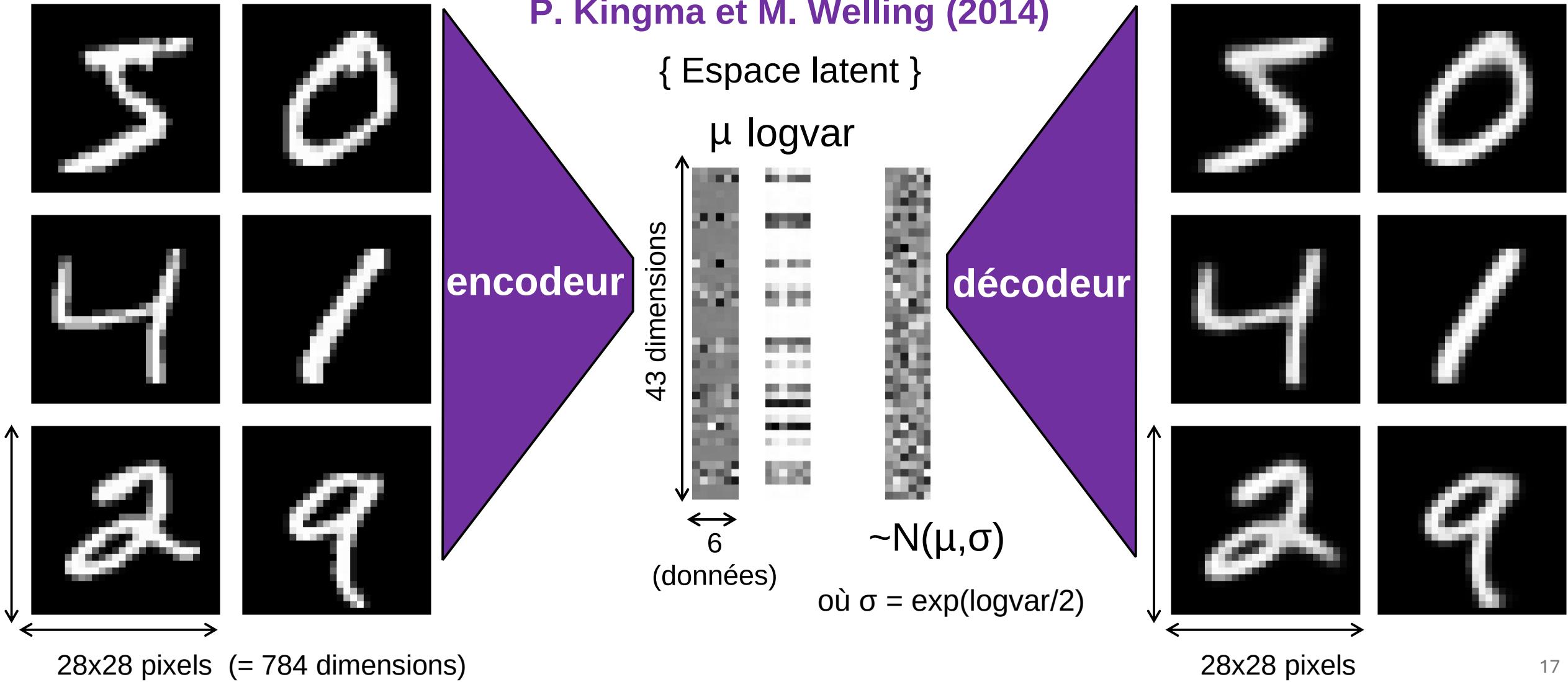
Titre	TOXICITES SEIN				
Type	Clinique				
DERMITE RADIQUE					
G0	G1	G2	G3	G4	G5
OEDEME LOCALISE					
G0	G1	G2	G3	G4	G5
PRURIT					
G0	G1	G2	G3	G4	G5
DOULEUR MAMMAIRE					
G0	G1	G2	G3	G4	G5



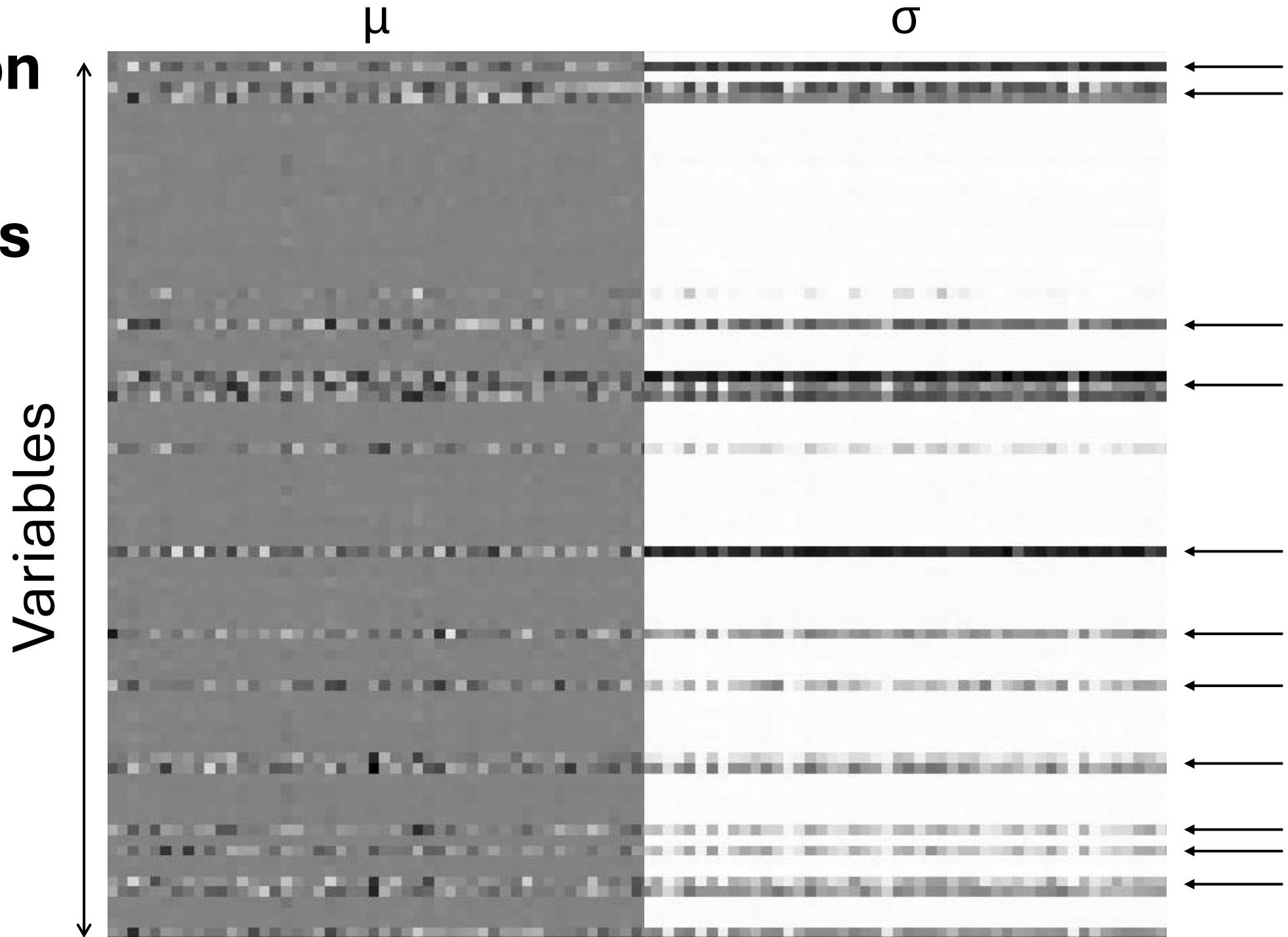
Structuration et synthèse des données techniques

AutoEncodeur Variationnel (VAE)

P. Kingma et M. Welling (2014)



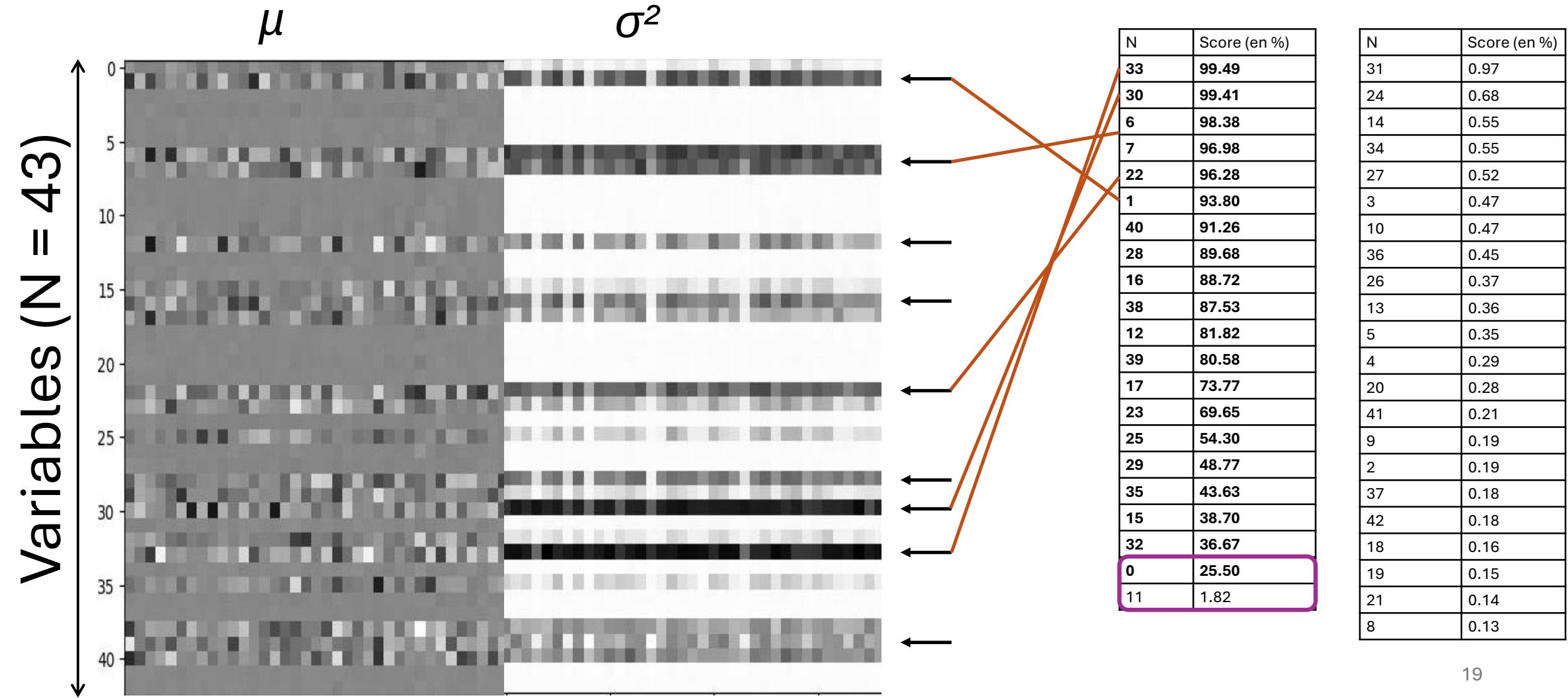
Sélection de variables



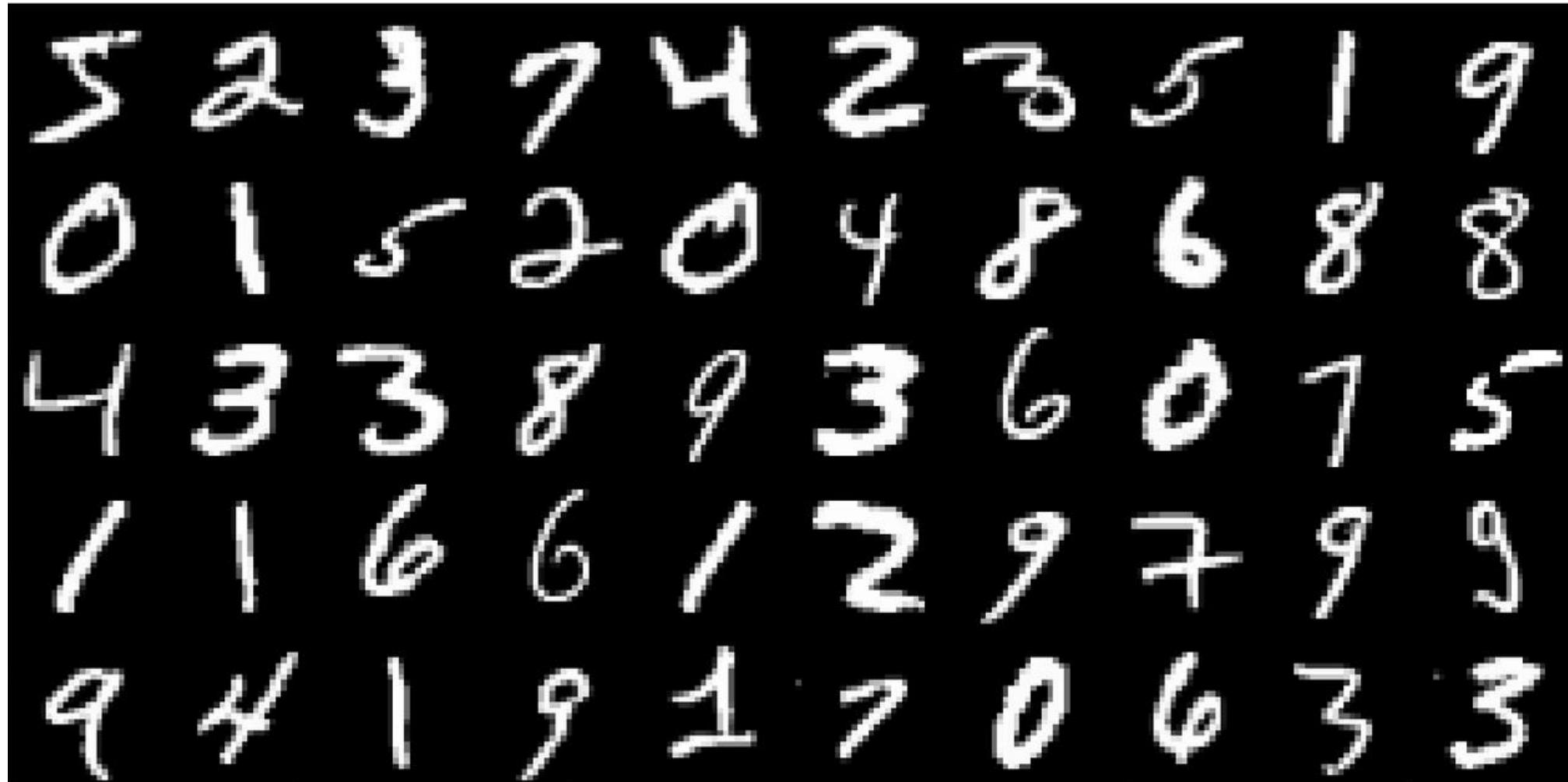
Sélection de variables

$$\frac{Var(\mu_i)}{Var(\mu_i) + E(\sigma_i^2)}$$

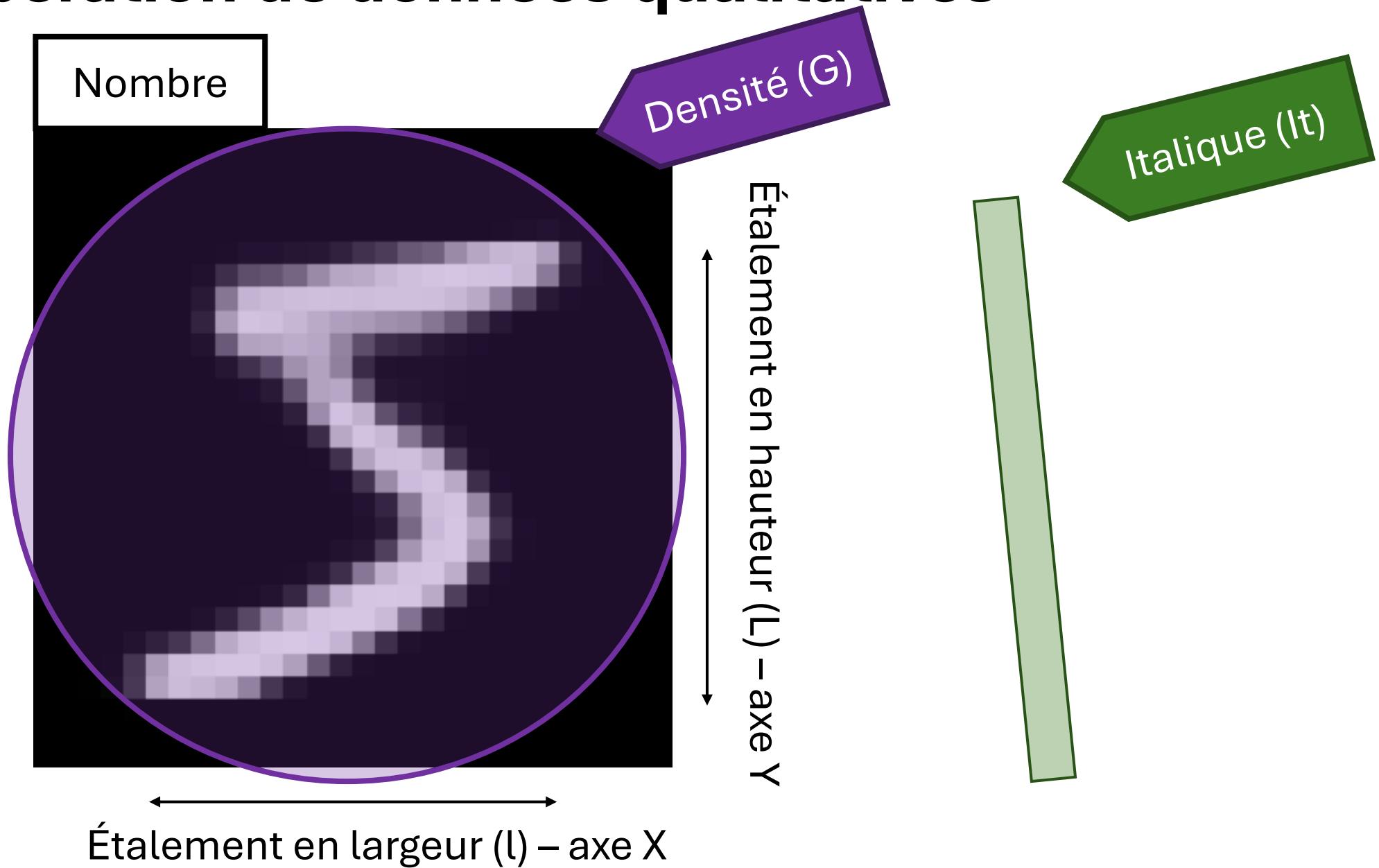
$$i \in [1, N]$$



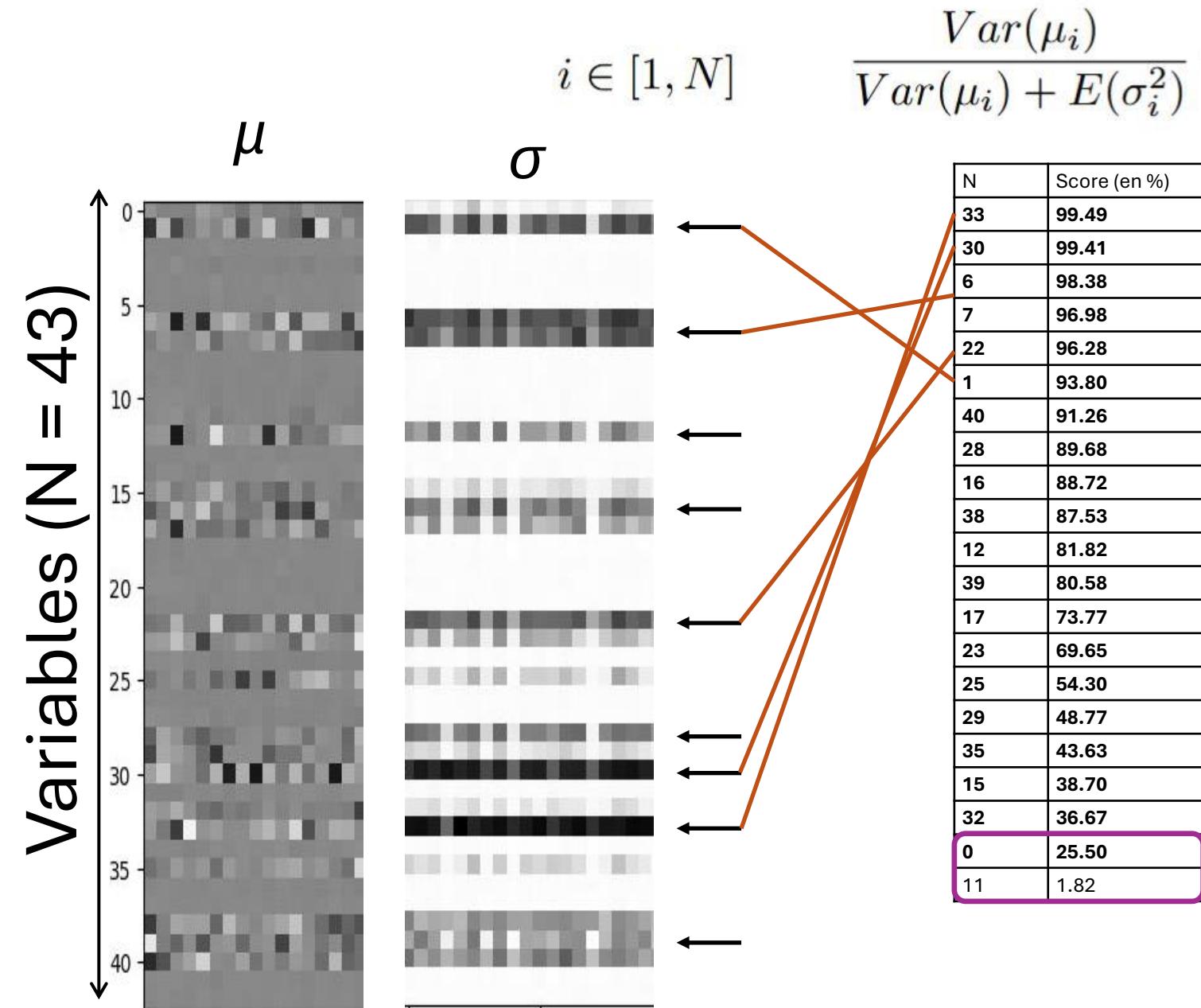
Preuve de concept sur les données MNIST



Récupération de données qualitatives



Variables sélectionnées



label	L_label	I_label	D_label	It_label
5	L1	I5	D2	It_3
0	L1	I4	D3	It_3
4	L1	I5	D1	It_1
1	L1	I3	D0	It_3
9	L1	I4	D1	It_2
2	L0	I5	D3	It_3
1	L1	I2	D0	It_1
3	L1	I4	D4	It_3
1	L1	I1	D0	It_2
4	L1	I4	D1	It_3

1-10 of 60,000 rows

Previous [1](#) [2](#) [3](#) [4](#) [5](#) [6](#) ... [100](#) Next

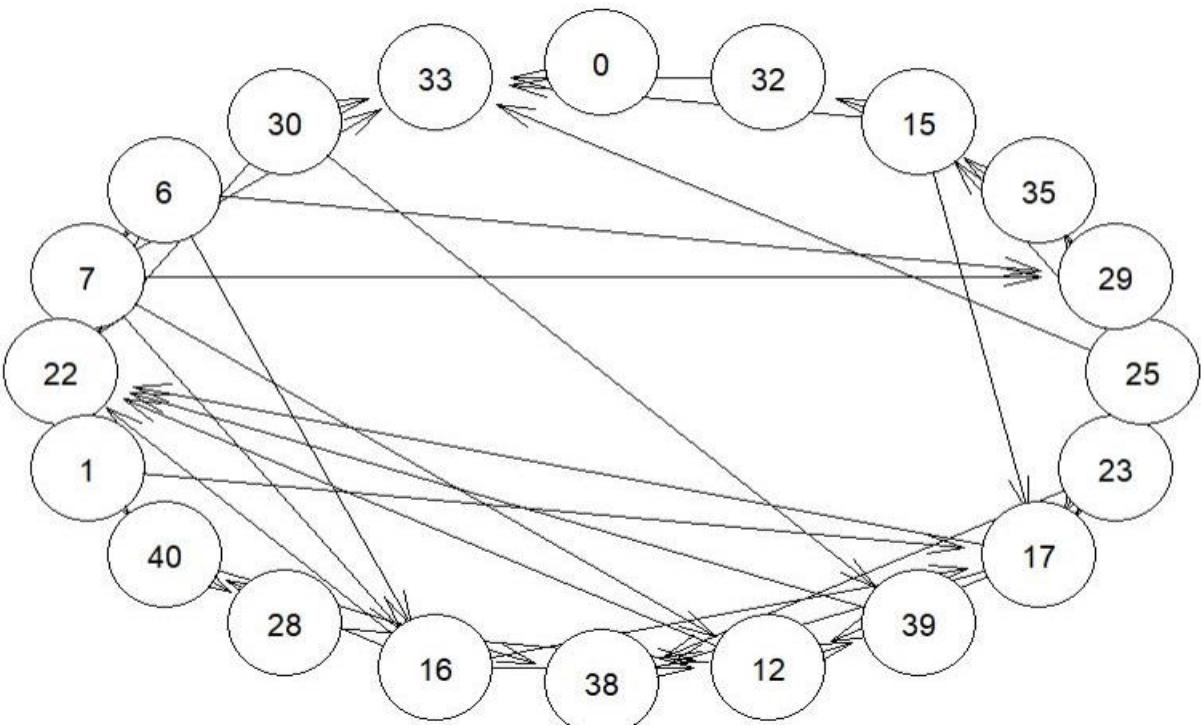
Réseau bayésien

```
```{r}
library(bnlearn)
library(data.table)
library(reshape2)
library(ggplot2)

continuous_dag <- mmhc(latent,
 restrict.args=list(test='mi-g', alpha=0.01),
 maximize.args = list(score="ebic-g"))

par(mar=c(0,0,0,0))
plot(continuous_dag)
...```

```



```
whitelisted_arcs <- data.frame(list(
 "from" = c(rep("label", length(nodes(continuous_dag))),
 rep("L_label", length(nodes(continuous_dag))),
 rep("l_label", length(nodes(continuous_dag))),
 rep("D_label", length(nodes(continuous_dag))),
 rep("It_label", length(nodes(continuous_dag)))
),
 "to"=c(nodes(continuous_dag),
 nodes(continuous_dag),
 nodes(continuous_dag),
 nodes(continuous_dag),
 nodes(continuous_dag)
)))
...```

```

```
head(whitelisted_arcs)
```

```
B_arcs <- rbind(arcs(continuous_dag), whitelisted_arcs)
head(B_arcs)
```

```
```{r}
bn_dag <- empty.graph(names(data))
arcs(bn_dag) <- B_arcs

bn_fitted <- bn.fit(bn_dag, data, method = "mle-cg")
...```

```

```
```{r}
set.seed(1234)
gen_sample <- rbn(bn_fitted, n=140000)
...```

```

# Données générées

Description : df[140,000 x 25]

X33 <dbl>	X30 <dbl>	X6 <dbl>	X7 <dbl>	X22 <dbl>	...	label <int>	L_label <chr>	I_label <chr>	D_label <chr>	It_label <chr>
0.077288267	0.405036151	-1.165462984	0.181461641	7.315012e-01	...	4	L1	I4	D1	It_2
-1.270766265	-1.523987321	1.246687600	2.961034183	-8.180157e-02	...	6	L1	I3	D0	It_1
-0.655181914	-0.562529969	-0.856514561	-1.230930802	9.832165e-01	...	7	L1	I5	D3	It_1
NA	NA	NA	NA	NA	...	7	L1	I3	D1	It_2
NA	NA	NA	NA	NA	...	2	L1	I2	D0	It_2
NA	NA	NA	NA	NA	...	5	L1	I2	D0	It_1
0.018434868	-1.373881062	-0.254424540	0.232200605	-1.366763e+00	...	5	L1	I3	D2	It_2
0.297738340	-1.277635700	0.352527230	-0.367549360	3.582528e-01	...	8	L1	I4	D4	It_2
-2.672928941	-0.978636451	-0.157741186	0.168834105	-1.268882e+00	...	6	L1	I4	D3	It_3
NA	NA	NA	NA	NA	...	0	L1	I5	D4	It_2
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Retirer les NaN : reste 83,477 lignes

Retirer les valeurs aberrantes : reste 58,503 lignes

# Exemple de données générées : nombre

0 6 0 0 0 0 0 0 0 0  
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

1 1 1 1 2 1 1 1 1  
1 1 1 1 3 1 1 1 1

2 2 2 3 2 2 2 1 2 2  
2 2 2 2 2 2 2 8 2 8

3 3 3 3 3 3 3 3 5 3  
3 3 3 3 0 3 3 3 3 3

4 1 4 4 4 9 9 4 6 4  
4 4 4 4 4 4 4 4 4 4

6 5 5 5 5 5 8 5 5 5  
9 5 5 8 5 5 5 5 8 9

6 6 6 6 6 6 6 6 6 6  
6 6 0 6 6 6 6 6 6 6

7 7 7 7 7 7 7 7 7 7  
7 7 7 7 1 7 7 7 7 7

8 8 8 8 8 8 8 9 8 8  
8 8 8 8 8 8 5 3 8 8

9 9 9 9 9 9 9 9 9 9  
9 9 9 9 0 9 5 9 9 9

# Exemple de données générées : italique et densité

5 5 7 8 9 6 9 5 5 5

8 9 6 0 7 2 0 8 9 0

4 7 4 9 3 5 7 4 5 9

9 4 4 9 6 9 3 4 5 7

8 3 9 3 7 3 9 8 7 2

1 8 4 7 9 0 5 8 3 4

5 1 3 5 7 8 2 9 5 5

7 9 7 3 9 8 1 0 9 5

3 4 8 1 9 6 7 1 8 9

3 1 2 9 2 3 1 9 9 9

7 3 3 9 5 6 9 1 0 2

7 3 3 9 9 0 8 4 3 9

9 3 6 0 4 4 7 3 5 5

1 2 2 9 6 0 6 2 8 7

# Exemple de données générées : largeur

1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	3
2	7	6	5	1	9	6	5	9	1
8	5	6	3	3	1	1	8	9	1
4	2	9	5	4	3	7	3	2	2
8	8	6	7	3	6	3	5	3	0
7	0	8	2	8	0	9	2	3	9
2	0	3	5	5	4	7	0	3	6

# Distribution des variables qualitatives

	label_MNIST	label_HYP	label
index			
0	9.87	9.14	9.47
1	11.23	5.93	6.46
2	9.93	9.71	9.31
3	10.21	12.08	11.20
4	9.73	10.43	9.43
5	9.03	9.76	9.43
6	9.86	7.95	8.19
7	10.44	10.41	10.28
8	9.75	10.53	11.04
9	9.91	11.52	12.65

	D_label_MNIST	D_label_HYP	D_label
index			
D0	18.33	15.52	15.65
D1	19.89	20.95	21.10
D2	20.33	21.34	19.60
D3	20.57	21.12	20.64
D4	20.86	18.55	20.50

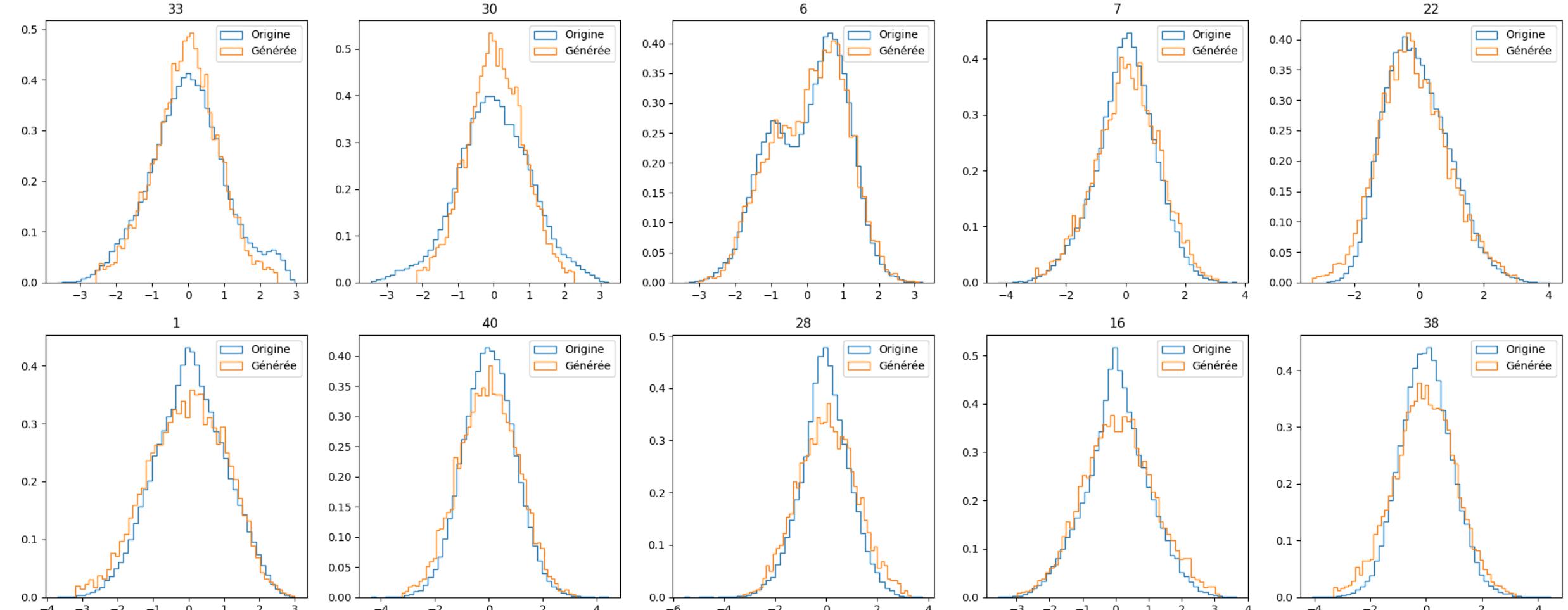
	It_label_MNIST	It_label_HYP	It_label
index			
It_0	6.01	2.39	4.16
It_1	14.22	11.39	11.85
It_2	54.45	70.76	61.53
It_3	16.82	11.02	15.25
It_4	8.49	1.91	4.71

	I_label_MNIST	I_label_HYP	I_label
index			
I0	0.03	0.00	NaN
I1	2.31	0.27	0.05
I2	4.88	4.68	1.70
I3	12.41	28.03	9.81
I4	31.81	41.34	34.47
I5	26.50	23.16	32.81
I6	21.94	NaN	18.53
I7	0.08	NaN	0.12

	L_label_MNIST	L_label_HYP	L_label
index			
L0	3.21	1.97	0.62
L1	96.78	95.52	96.88

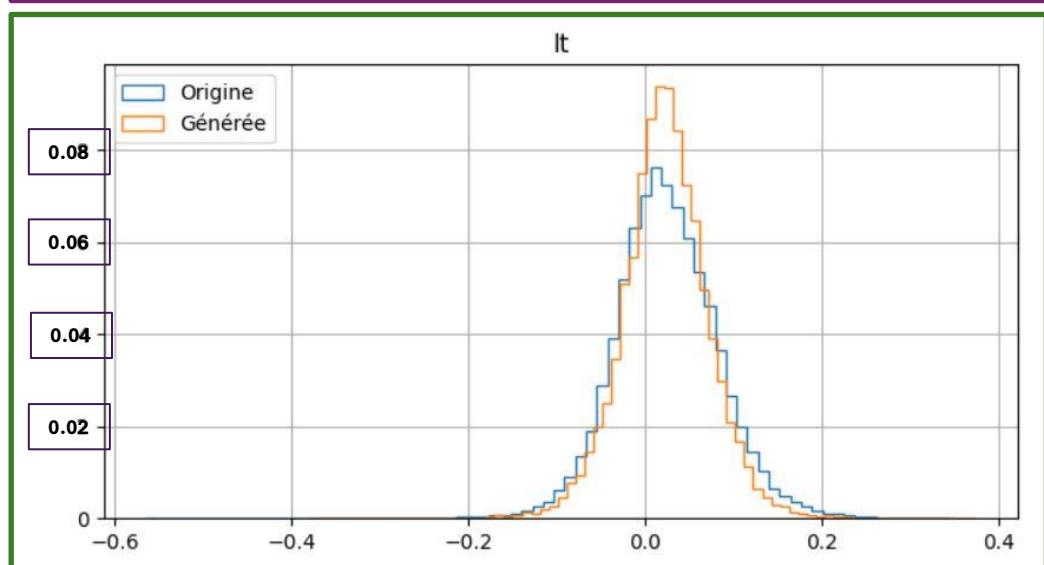
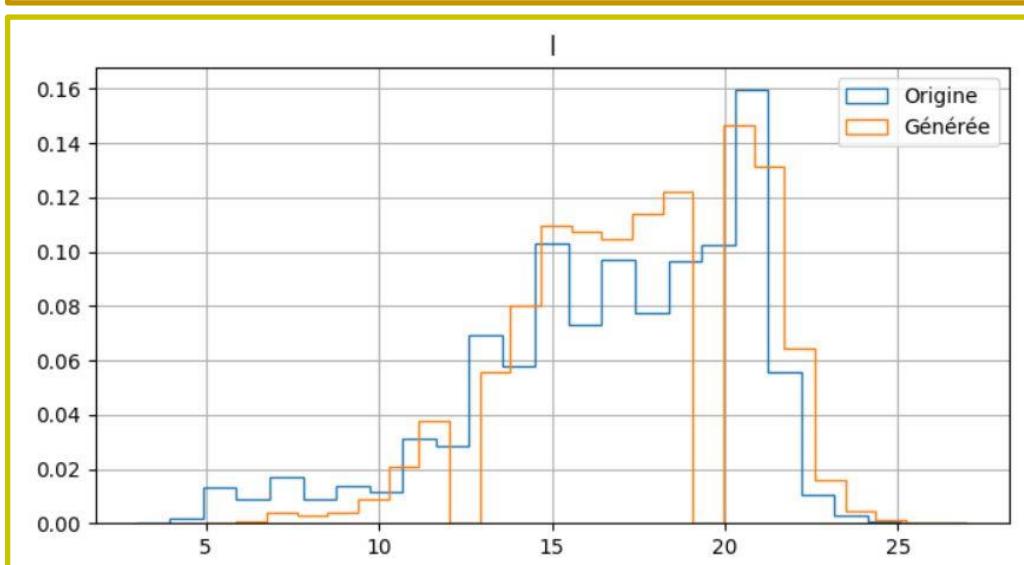
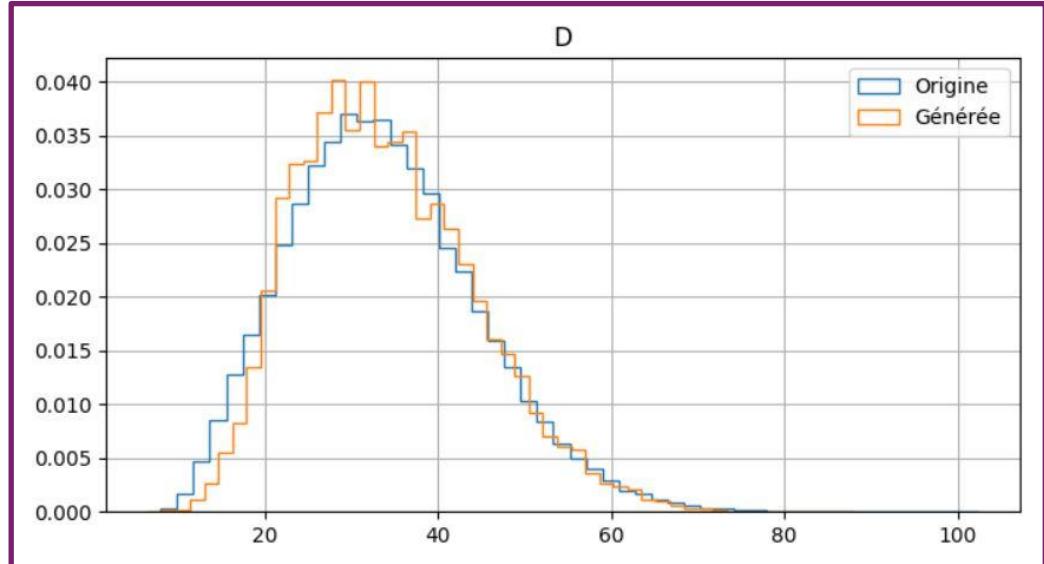
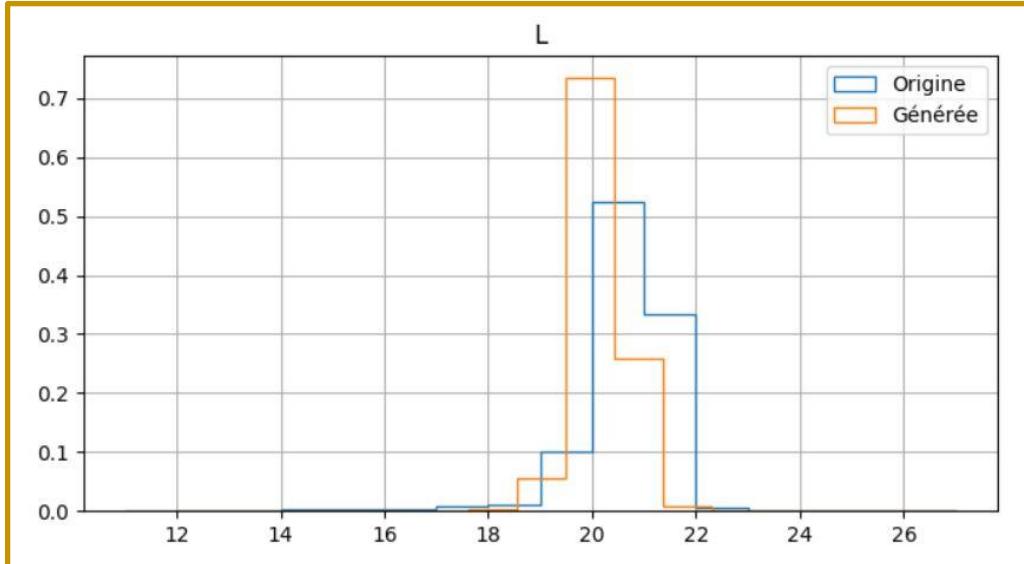
# Distribution des variables quantitatives

## Densités des variables latentes : origine vs générée



# Distribution des variables quantitatives

## Densité des classes : origine vs générée



# Évaluation des données : tableaux de contingence

calc_I_label	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	All
hyp_I_label								
I0	2	1	0	0	0	0	0	3
I1	15	129	12	9	2	0	0	167
I2	7	477	1814	443	67	2	1	2811
I3	5	286	3404	10685	2159	277	2	16818
I4	1	127	505	9087	12097	2975	15	24807
I5	0	2	154	458	5363	7866	54	13897
All	30	1022	5889	20682	19688	11120	72	58503

calc_D_label	D0	D1	D2	D3	D4	All
hyp_D_label						
D0	6684	2301	271	57	4	9317
D1	2176	6987	2787	535	85	12570
D2	441	2781	6017	3005	562	12806
D3	77	541	2445	6798	2815	12676
D4	12	52	244	1989	8837	11134
All	9390	12662	11764	12384	12303	58503

calc_L_label	L0	L1	All
hyp_L_label			
L0	314	873	1187
L1	61	57255	57316
All	375	58128	58503

calc_It_label	It_0	It_1	It_2	It_3	It_4	All
hyp_It_label						
It_0	1169	233	27	0	10	1439
It_1	1040	4236	1535	9	18	6838
It_2	284	2634	34651	4458	433	42460
It_3	3	6	689	4553	1366	6617
It_4	1	1	16	130	1001	1149
All	2497	7110	36918	9150	2828	58503

# Évaluation des données : tableaux de contingence

calc_label	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	All
hyp_label											
0	5005	38	61	32	16	39	160	21	84	30	5486
1	4	3127	84	34	20	34	46	22	171	17	3559
2	22	152	4715	273	6	36	93	90	412	29	5828
3	58	123	201	5897	17	395	26	66	289	180	7252
4	26	80	29	4	5144	30	48	219	48	633	6261
5	56	62	39	296	18	4727	200	19	298	145	5860
6	231	34	28	11	39	86	4261	2	61	20	4773
7	75	85	148	15	155	3	5	5409	37	315	6247
8	119	136	223	144	48	288	66	65	5076	155	6320
9	87	43	62	16	200	22	12	258	150	6067	6917
All	5683	3880	5590	6722	5663	5660	4917	6171	6626	7591	58503

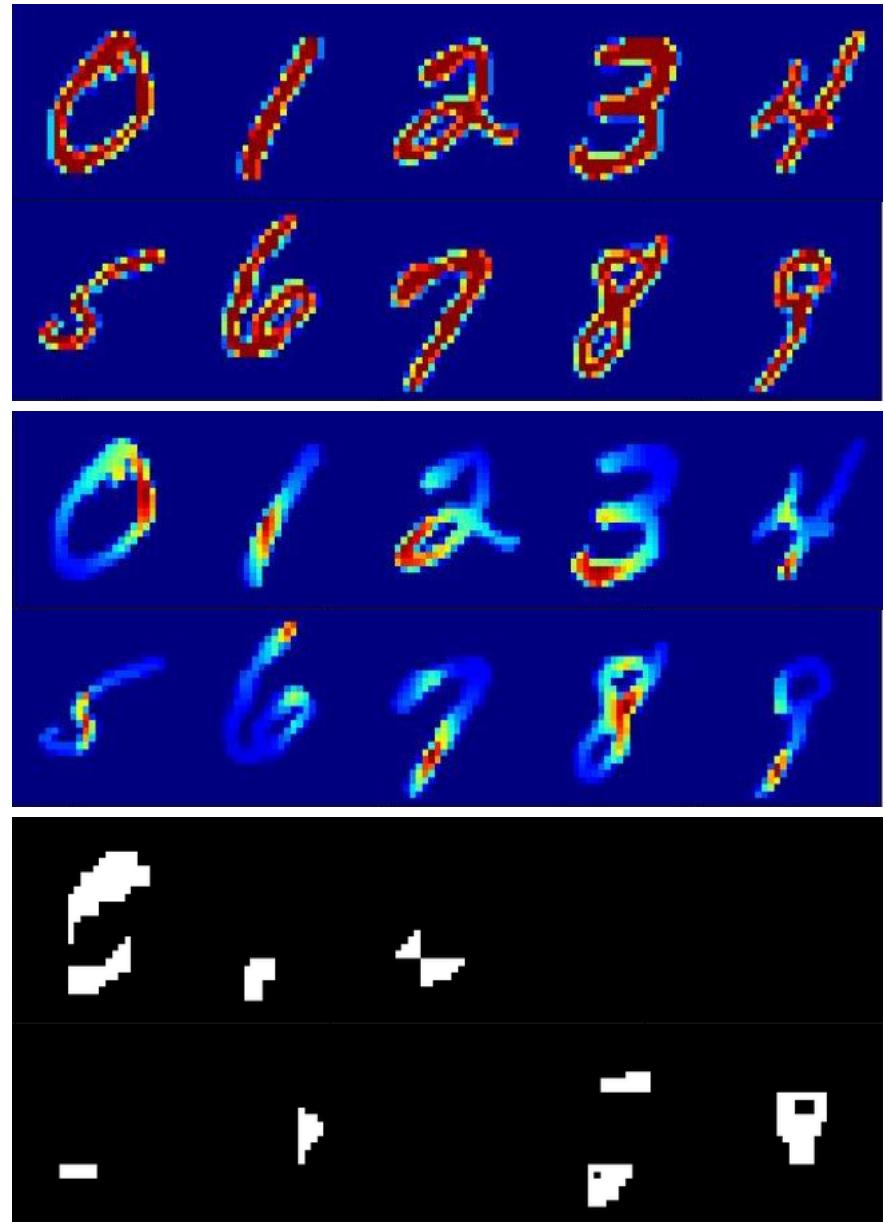
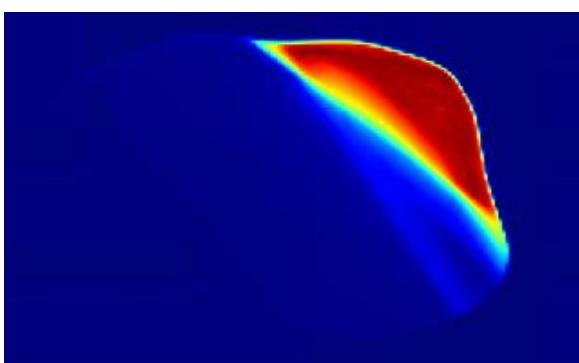
# Les subtilités qui ne sont pas prises en compte actuellement

- Les choix sont à la discréction des médecins, il existe une variabilité dépendante du radiothérapeute qui peut apporter des difficultés à comprendre
  - Les choix du passage d'un traitement total à un traitement,
  - Les choix d'insister sur telle ou telle partie du traitement,
  - Les choix de réduire le volume du PTV pour éviter des complications aux tissus sains
- Des analyses complémentaires de sensibilité des données :
  - Différence entre dose émise et dose reçue

# Perspectives : à court terme

Affiner l'approche des données MNIST :

- en explicitant l'analogie avec les données de radiothérapie,
- en étudiant la possibilité d'identifier un lien entre un effet toxique et une localisation.



# MERCI

[paul.michaux@utt.fr](mailto:paul.michaux@utt.fr)

[paul.michaux@avec.fr](mailto:paul.michaux@avec.fr)