

MISE EN PLACE D'UNE ASSURANCE PARAMÉTRIQUE POUR GARANTIR LA RENTABILITÉ D'UN PARC ÉOLIEN

Iris GUEZENNEC

13/09/2023

SOMMAIRE

- 1 • CONTEXTE & PROBLÉMATIQUE
- 2 • CONSTRUCTION DE L'INDICE & VARIABILITÉS
- 3 • MÉTHODES DE TARIFICATION
- 4 • DIVERSIFICATION GÉOGRAPHIQUE
- 5 • AUTRES PERSPECTIVES D'ÉTUDE

SOMMAIRE

- 1 • CONTEXTE & PROBLÉMATIQUE**
- 2 • CONSTRUCTION DE L'INDICE & VARIABILITÉS
- 3 • MÉTHODES DE TARIFICATION
- 4 • DIVERSIFICATION GÉOGRAPHIQUE
- 5 • AUTRES PERSPECTIVES D'ÉTUDE

- Parc éolien : risques assurables ?

Les éoliennes sont des infrastructures qui utilisent la **force du vent** pour pouvoir produire de l'électricité.
En France, les productions des **2 100 parcs éoliens onshore** sont confrontées à 4 familles de risque :

Maintenance préventive
et prédictive



Incidences techniques /
Défaillances

Catastrophes /
Dommages matériels
(incendie, foudre...)



Volatilité du vent



Puissance du vent \propto cube de la vitesse du vent

Risque sur le rendement éolien

- Problématique

COMMENT ÉTABLIR LA TARIFICATION D'UNE ASSURANCE PARAMÉTRIQUE COUVRANT LE RENDEMENT ÉOLIEN À PARTIR DE DONNÉES DE VITESSES DE VENT ?

- Pourquoi proposer l'assurance paramétrique ?

L'assurance paramétrique se prête mieux à la couverture du rendement (théorique) d'un producteur d'énergie éolienne.

Assurance indemnitaire classique

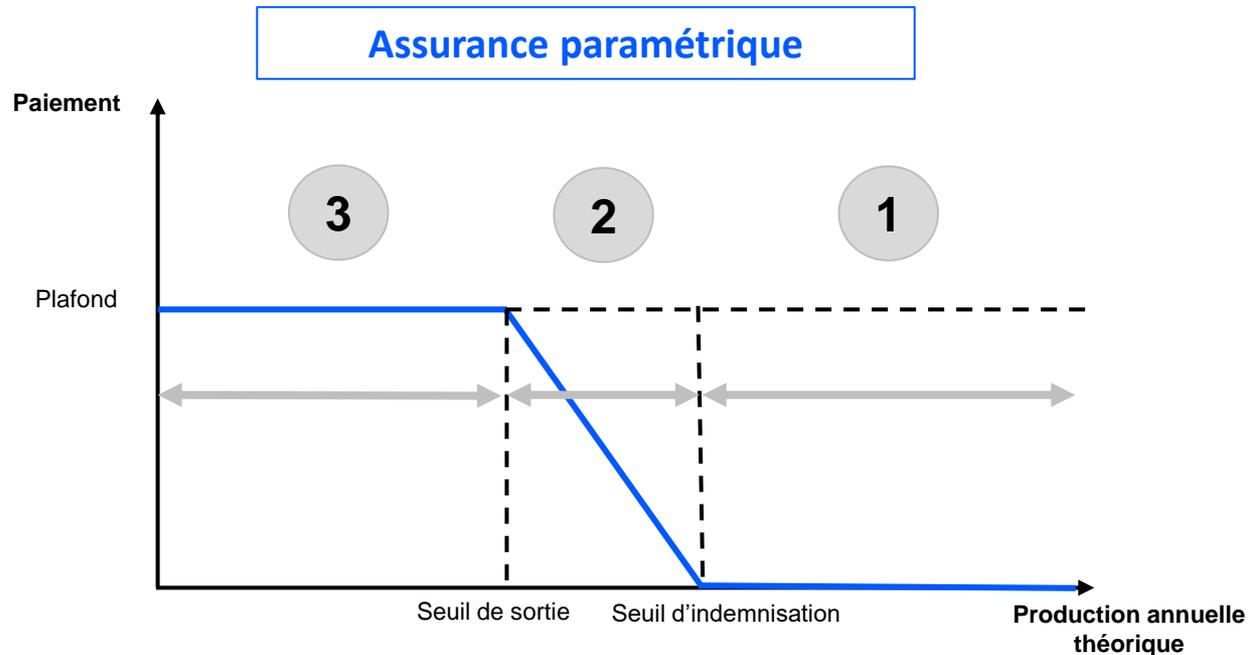
- Couverture des **pertes réelles**
- Survenance du **dommage** déclenche l'indemnisation et le déplacement d'un expert
- Besoin de **données réelles de fréquence et de coût**

Assurance paramétrique

- Couverture des **pertes théoriques** (risques plus larges)
- Indemnisation **automatique** dépend d'une **fonction de paiement** et d'un **indice** convenu à l'avance
- **Construction d'un indice** représentatif du risque

- Pourquoi proposer l'assurance paramétrique ?

L'assurance paramétrique se prête mieux à la couverture du rendement (théorique) d'un producteur d'énergie éolienne.



- Parc éolien : risques assurables ?

Era5-Land



Données de réanalyse

Composantes u (vent zonal) et v (vent méridien) du vent

Mesures à **10 m et 100 m** du sol

Maille: **1h**

Données récupérées : 1991 - 2021



Transformation en **vitesse de vent**

Extrapolation au niveau du **moyeu**

Description du **passé**

The Wind Power



Données des parcs éoliens

Emplacement des parcs

Données sur les turbines

Courbes de puissance



Répartition dans **différentes régions** de France

Eoliennes tri pales à axe horizontal

Proches de stations météo

Pas d'obstacles environnants

Pas d'effets de sillage

Surface plate

CORDEX-CMIP5



Projections climatiques

Projections de vitesses de vent jusqu'à horizon 2100

Mesures à **10 m** du sol

Maille: **3h**

Données récupérées : 2018 - 2035

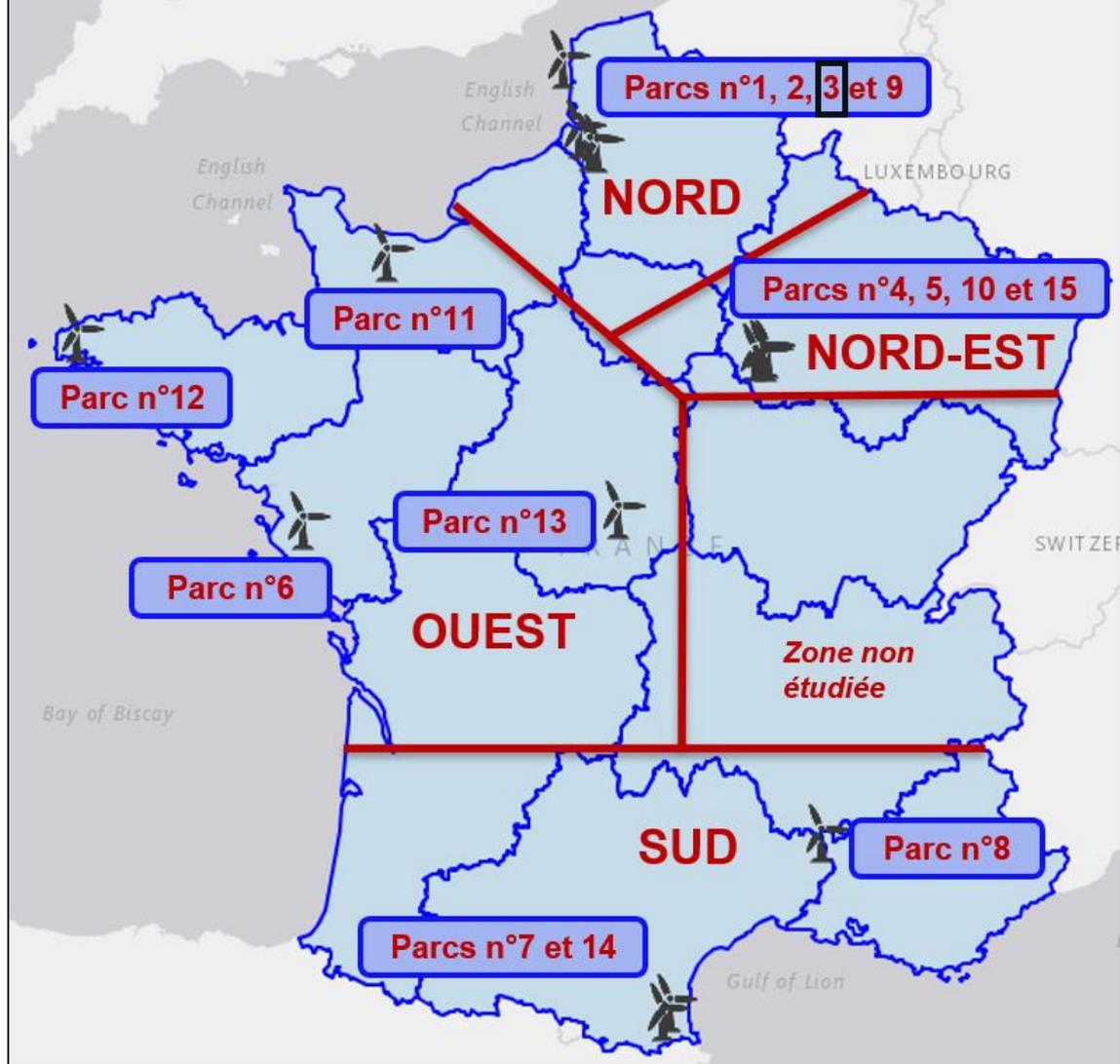


Extrapolation au niveau du **moyeu**

Ajustement par rapport à ERA5-Land

Description du **futur**

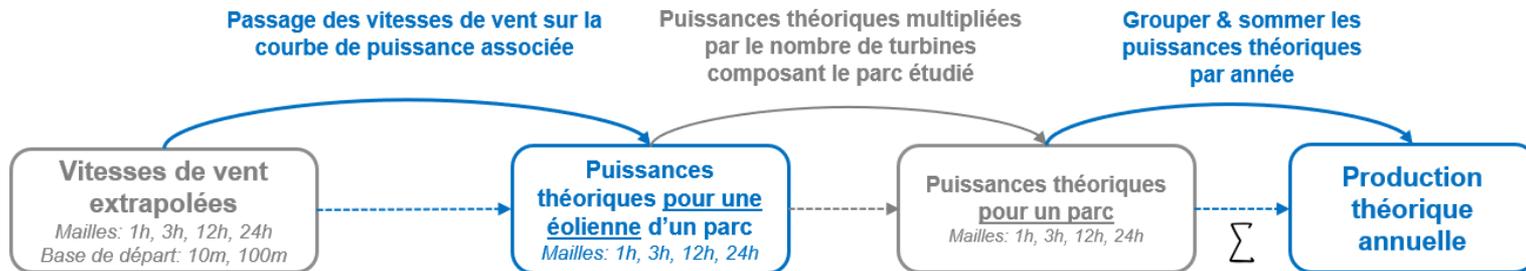
3 scénarios RCP du GIEC: 2.6, 4.5, 8.5



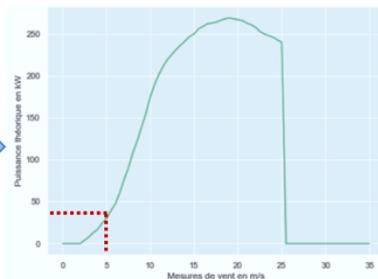
SOMMAIRE

- 1 • CONTEXTE & PROBLÉMATIQUE
- 2 • CONSTRUCTION DE L'INDICE & VARIABILITÉS**
- 3 • MÉTHODES DE TARIFICATION
- 4 • DIVERSIFICATION GÉOGRAPHIQUE
- 5 • AUTRES PERSPECTIVES D'ÉTUDE

- Comment obtenir la production théorique annuelle ?

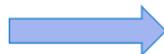


Exemple:
5 m/s



30 kW

datetime	ws_h	puiss_th_year	year
2018-01-01 01:00:00+00:00	3.523348	0	2018
2018-01-01 02:00:00+00:00	3.523352	0	2018
2018-01-01 03:00:00+00:00	3.523356	0	2018
2018-01-01 04:00:00+00:00	6.085376	409.881685	2018
2018-01-01 05:00:00+00:00	6.085380	409.883069	2018
...



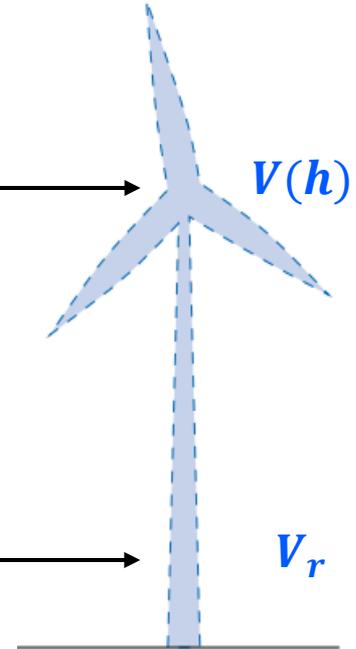
year	puiss_th_year
2018	53588697.058447
2019	56993590.718034
2020	55350874.660938
2021	54200082.33523

- Comment obtenir la production théorique annuelle ?

**Vitesses de vent
extrapolées**
Mailles: 1h, 3h, 12h, 24h
Base de départ: 10m, 100m

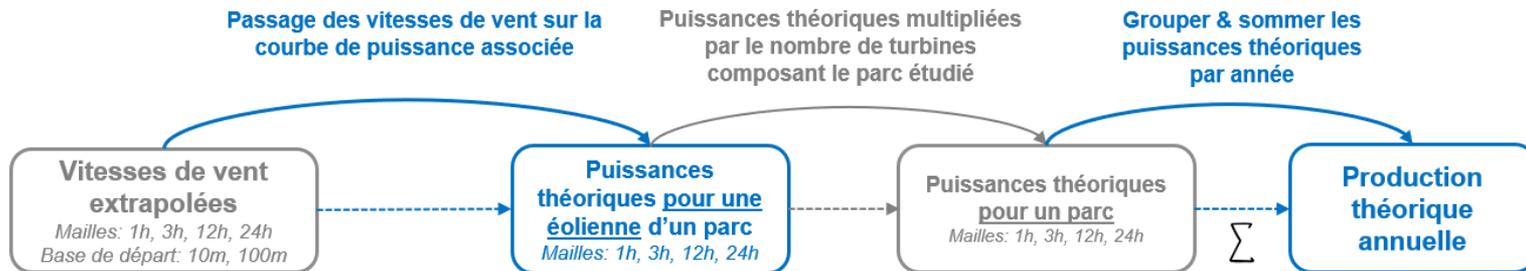
Hauteur visée : h → $V(h)$

Hauteur de la mesure : h_r → V_r

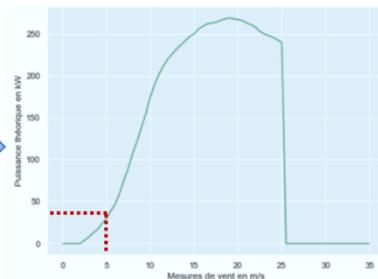


Formule d'extrapolation : $V(h) = V_r \cdot \left(\frac{h}{h_r}\right)^\alpha$

- Comment obtenir la production théorique annuelle ?

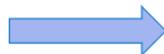


Exemple:
5 m/s



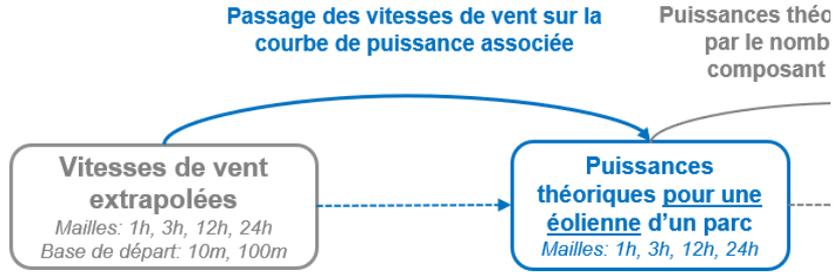
30 kW

datetime	ws_h	puiss_th_year	year
2018-01-01 01:00:00+00:00	3.523348	0	2018
2018-01-01 02:00:00+00:00	3.523352	0	2018
2018-01-01 03:00:00+00:00	3.523356	0	2018
2018-01-01 04:00:00+00:00	6.085376	409.881685	2018
2018-01-01 05:00:00+00:00	6.085380	409.883069	2018
...

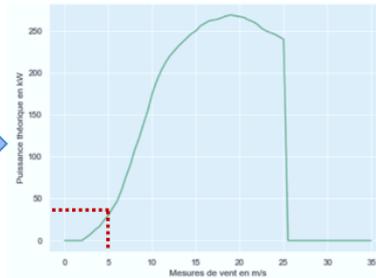


year	puiss_th_year
2018	53588697.058447
2019	56993590.718034
2020	55350874.660938
2021	54200082.33523

- Comment obtenir la production théorique annuelle ?



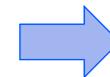
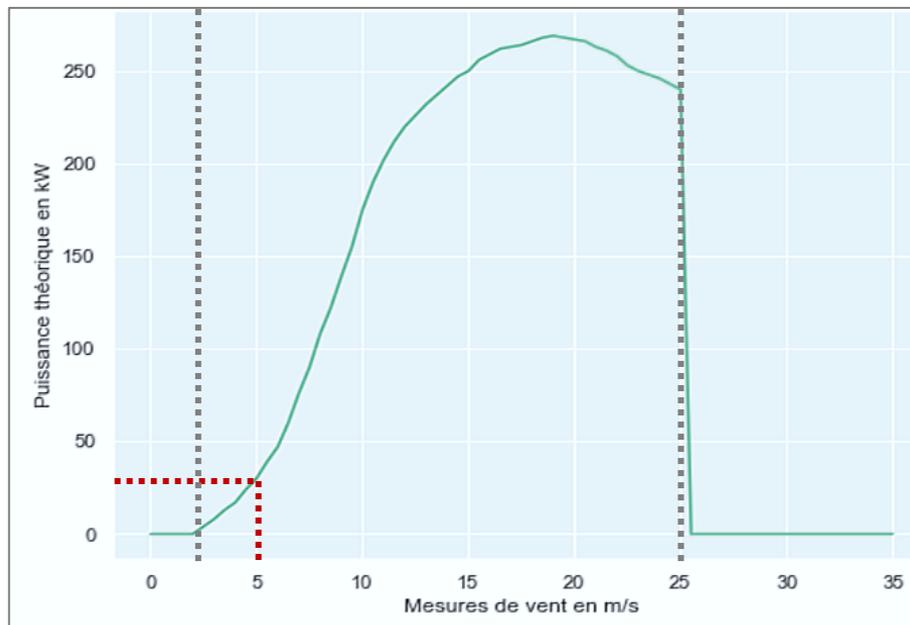
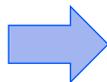
Exemple:
5 m/s



30 kW

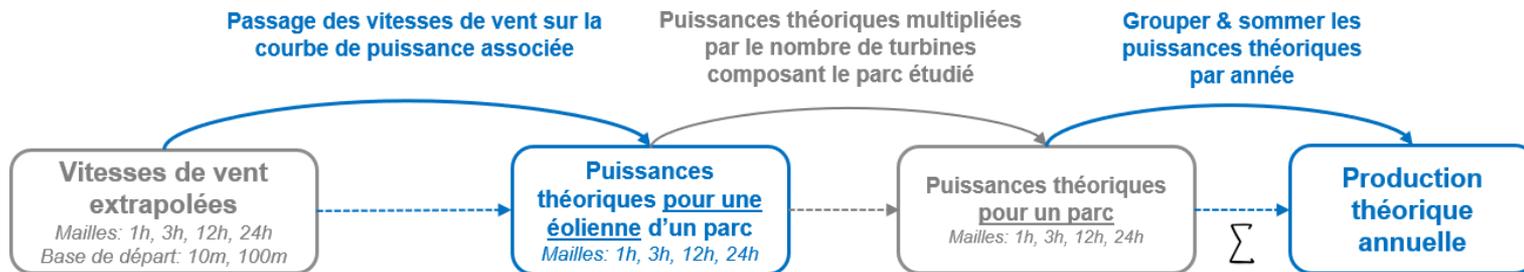
- Comment obtenir la production théorique annuelle ?

Exemple :
5 m/s

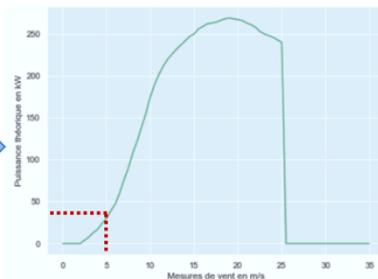


30 kW

- Comment obtenir la production théorique annuelle ?



Exemple:
5 m/s



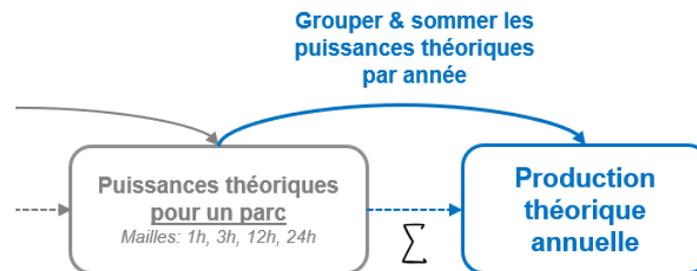
30 kW

datetime	ws_h	puiss_th_year	year
2018-01-01 01:00:00+00:00	3.523348	0	2018
2018-01-01 02:00:00+00:00	3.523352	0	2018
2018-01-01 03:00:00+00:00	3.523356	0	2018
2018-01-01 04:00:00+00:00	6.085376	409.881685	2018
2018-01-01 05:00:00+00:00	6.085380	409.883069	2018
...

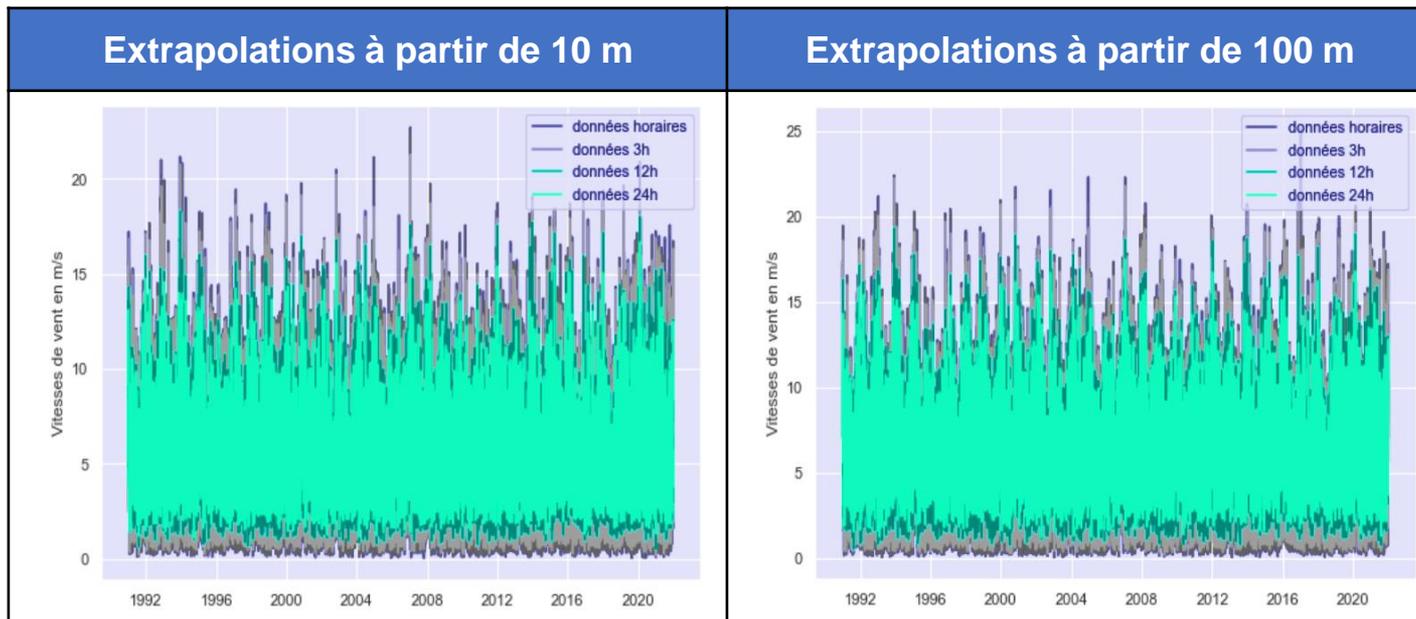
year	puiss_th_year
2018	53588697.058447
2019	56993590.718034
2020	55350874.660938
2021	54200082.33523

- Comment obtenir la production théorique annuelle ?

Date	Puissances horaires
1991-01-01 00:00	3,52
1991-01-01 01:00	2,02
1991-01-01 02:00	4,21
1991-01-01 03:00	5,63
...	...
...	...
...	...
...	...
...	...
...	...
2021-12-31 20:00	3,52
2021-12-31 21:00	2,02
2021-12-31 22:00	4,21
2021-12-31 23:00	5,63



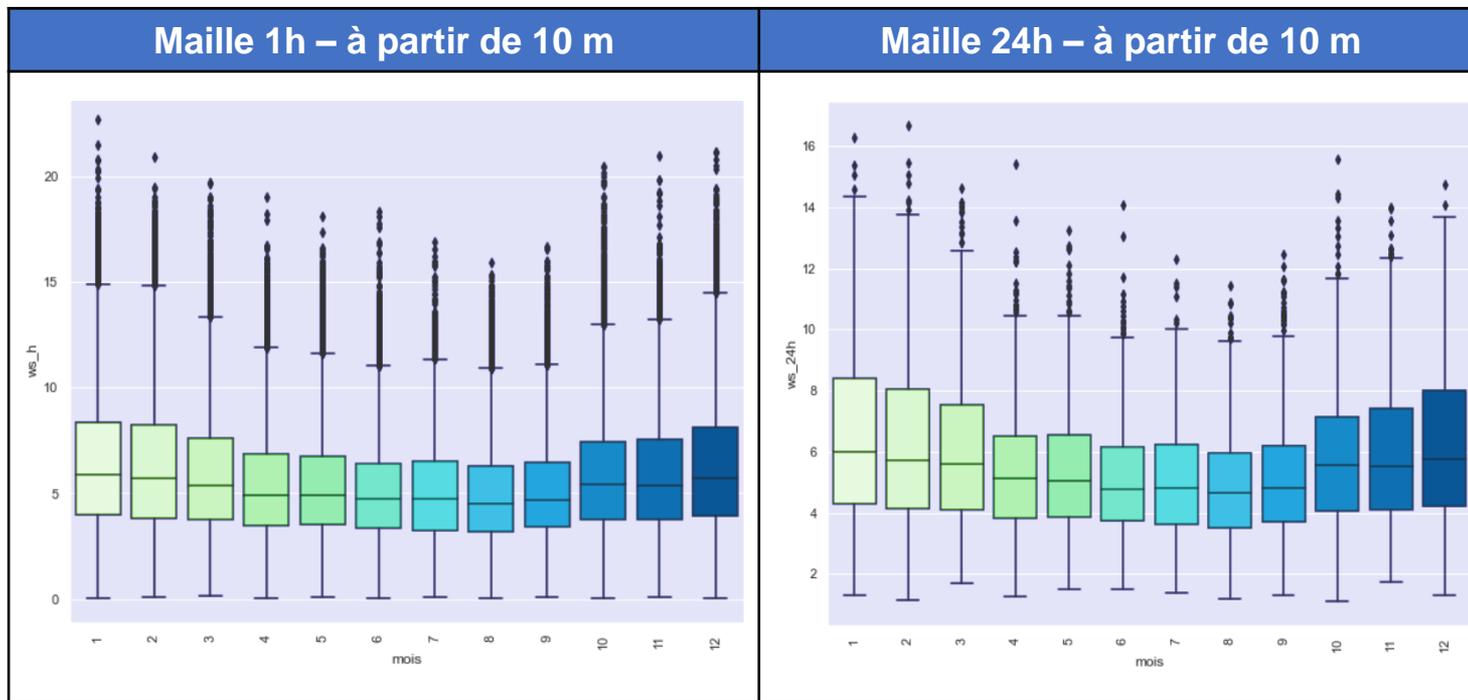
- Etude de variabilités des vitesses de vent - Vision globale de 1991 à 2021



Tendance de 5,64 à 5,57 m/s

Tendance de 6,49 à 6,35 m/s

- Etude de variabilités des vitesses de vent - Vision intra-annuelle : vision mensuelle



- Etude de variabilités des vitesses de vent - Intermittences

Hauteur de base	Maille	Pourcentage de manque de vent
10 m	1h	23,5%
	3h	23,3%
	12h	20%
	24h	18%
100 m	1h	16,1%
	3h	15,8%
	12h	13,8%
	24h	11,3%

- Etude de variabilités des productions théoriques

$$\text{Variabilité} = \frac{\text{Production annuelle} - \text{Moyenne historique}}{\text{Production annuelle}} \cdot 100$$

2 – CONSTRUCTION DE L'INDICE & VARIABILITES

- Etude de variabilités des productions théoriques

année	1h_10m	3h_10m	12h_10m	24h_10m	1h_100m	3h_100m	12h_100m	24h_100m
1991	-6	-6	-6	-5	-5	-5	-5	-5
1992	2	2	3	2	3	2	3	2
1993	4	4	4	4	4	4	4	4
1994	12	12	13	14	10	10	11	11
1995	6	6	7	8	5	5	6	7
1996	-9	-9	-10	-11	-7	-7	-7	-8
1997	-10	-10	-10	-9	-9	-8	-9	-9
1998	14	14	15	16	10	10	10	11
1999	13	13	15	15	10	10	12	13
2000	9	9	10	10	9	9	9	10
2001	-1	-1	-1	-3	1	0	1	0
2002	10	11	11	12	10	11	10	11
2003	-17	-17	-18	-19	-12	-12	-13	-13
2004	-1	-1	-1	0	-1	-1	-1	0
2005	-14	-14	-16	-16	-10	-11	-12	-13
2006	0	0	-1	-1	3	2	3	3
2007	6	6	8	10	4	5	5	7
2008	5	5	6	6	5	6	6	6
2009	-6	-6	-7	-7	-5	-5	-5	-5
2010	-18	-18	-21	-21	-16	-17	-17	-19
2011	-3	-4	-4	-5	-2	-3	-3	-4
2012	-1	-2	-2	-3	-1	-1	-2	-3
2013	-5	-5	-5	-5	-3	-4	-4	-3
2014	-3	-3	-3	-2	-1	-1	-1	0
2015	11	11	12	11	10	10	11	10
2016	-7	-7	-8	-7	-7	-7	-7	-6
2017	-7	-8	-9	-10	-8	-8	-9	-10
2018	-8	-8	-9	-8	-7	-7	-8	-8
2019	4	4	4	5	3	3	3	3
2020	28	28	30	30	18	18	19	20
2021	-8	-8	-8	-10	-9	-9	-10	-11

- Etude de variabilités des productions théoriques

-17	-17	-18	-19	-12	-12	-13	-13
-1	-1	-1	0	-1	-1	-1	0
-14	-14	-16	-16	-10	-11	-12	-13
0	0	-1	-1	3	2	3	3
6	6	8	10	4	5	5	7
5	5	6	6	5	6	6	6
-6	-6	-7	-7	-5	-5	-5	-5
-18	-18	-21	-21	-16	-17	-17	-19
-3	-4	-4	-5	-2	-3	-3	-4
-1	-2	-2	-3	-1	-1	-2	-3
-5	-5	-5	-5	-3	-4	-4	-3



**Proposition de
couvrir les variabilités
(négatives) $\geq 10\%$**

SOMMAIRE

- 1 • CONTEXTE & PROBLÉMATIQUE
- 2 • CONSTRUCTION DE L'INDICE & VARIABILITÉS
- 3 • MÉTHODES DE TARIFICATION**
- 4 • DIVERSIFICATION GÉOGRAPHIQUE
- 5 • AUTRES PERSPECTIVES D'ÉTUDE

SOMMAIRE

3 • MÉTHODES DE TARIFICATION

a) Approche n°1

- Approche historique

1

Importation des 31 productions théoriques (1991-2021)

2

Détermination des seuils d'indemnisation

3

Déclenchements d'indemnisation dans le passé ?

4

Calcul des primes pures

5

Part des primes pures sur le rendement moyen passé

- Approche historique

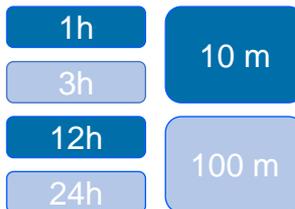
1

Importation des 31 productions théoriques (1991-2021)

ERA5-Land
ECMWF



Choix de la granularité
des données



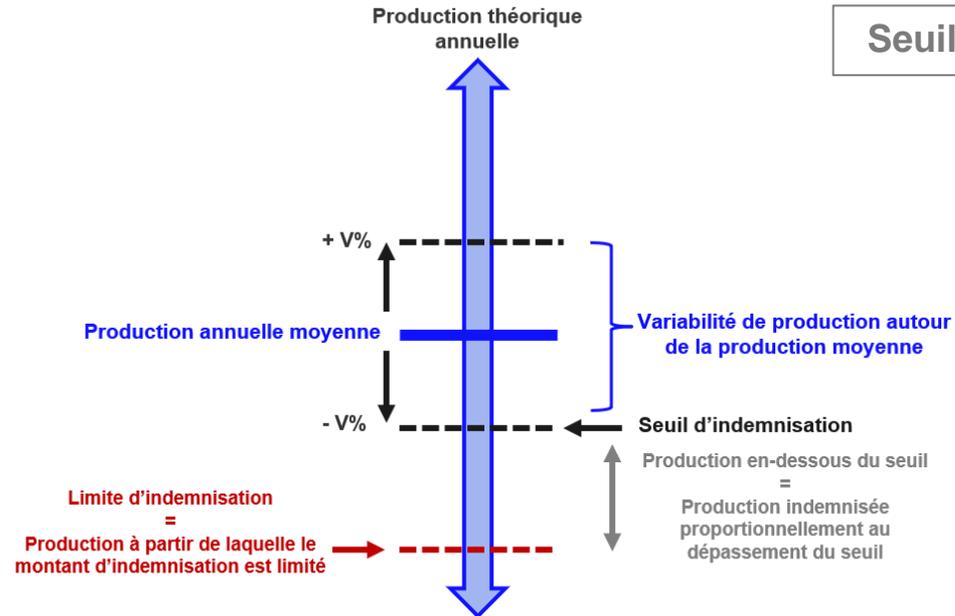
Année	Production
1991	16 235 612
1992	17 616 642
1993	17 967 349
1994	19 295 429
1995	18 225 353
1996	15 630 974
1997	15 464 568
1998	19 621 482
1999	19 488 731
2000	18 848 172
2001	17 008 150
2002	19 050 080
2003	14 297 075
2004	17 122 071
2005	14 790 725
2006	17 134 622
2007	18 319 223
2008	18 161 472
2009	16 199 840
2010	14 055 651
2011	16 605 869
2012	16 947 519
2013	16 365 616
2014	16 722 128
2015	19 196 692
2016	16 007 650
2017	15 887 912
2018	15 819 807
2019	17 854 123
2020	22 014 279
2021	15 869 865

Exemple : 3h, 10m

- Approche historique

2

Détermination des seuils d'indemnisation

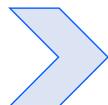


- Approche historique

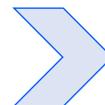
3

Déclenchements d'indemnisation dans le passé ?

Exemple :
3h, 10m, V = 16 %



Année	Productions théoriques	Dépassement seuil min
1991	16235612	0
1992	17616642	0
1993	17967349	0
1994	19295429	0
1995	18225353	0
1996	15630974	0
1997	15464568	0
1998	19621482	0
1999	19488731	0
2000	18848172	0
2001	17008150	0
2002	19050080	0
2003	14297075	1
2004	17122071	0
2005	14790725	0
2006	17134622	0
2007	18319223	0
2008	18161472	0
2009	16199840	0
2010	14055651	1
2011	16605869	0
2012	16947519	0
2013	16365616	0
2014	16722128	0
2015	19196692	0
2016	16007650	0
2017	15887912	0
2018	15819807	0
2019	17854123	0
2020	22014279	0
2021	15869865	0



En cas d'indemnisation, on rembourse
le coût du manque à gagner :
(Seuil – Production théorique) . 0,082

- Approche historique

4

Calcul des primes pures

$$\text{Prime pure} = \frac{1}{31} \sum_{i=1}^{31} \text{Indemnisation}_i$$

5

Part des primes pures sur le rendement moyen passé

Part = Prime pure / Rendement moyen

Où : Rendement moyen = Production théorique moyenne . 0,082

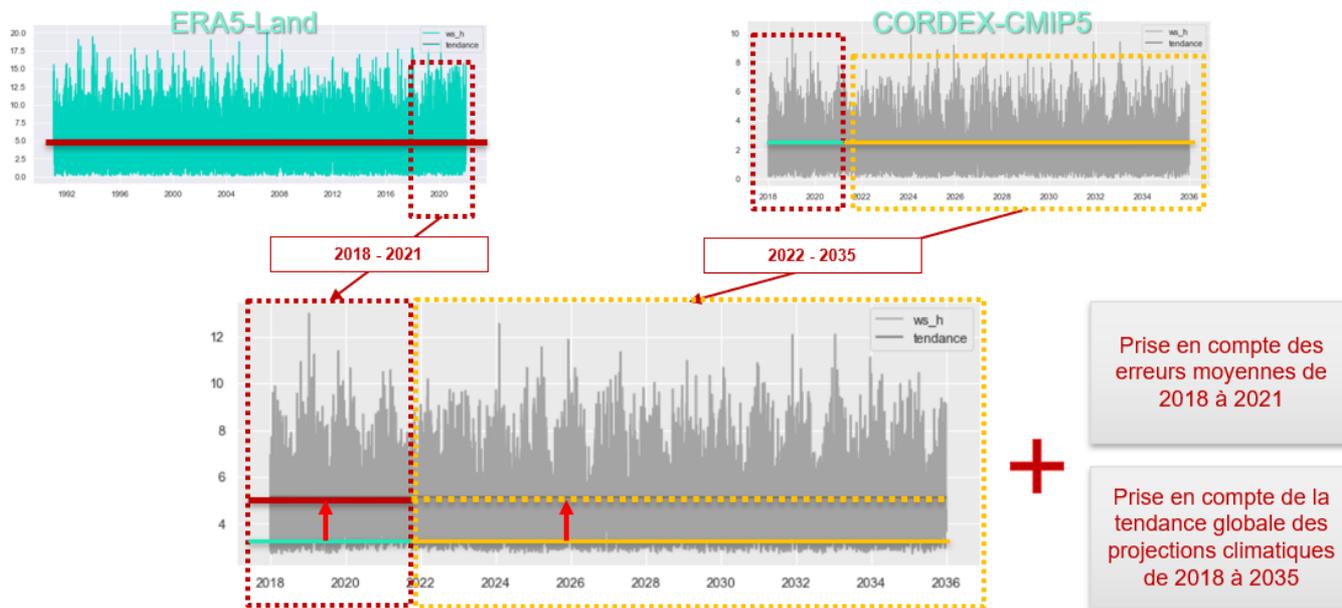
SOMMAIRE

3 • MÉTHODES DE TARIFICATION

b) Approche n°2

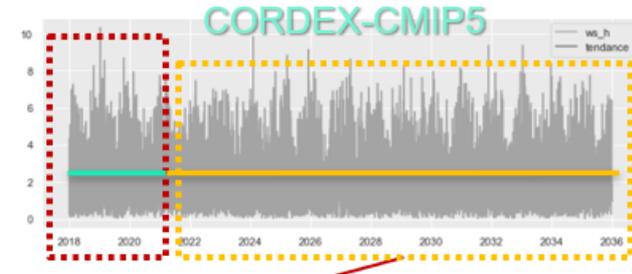
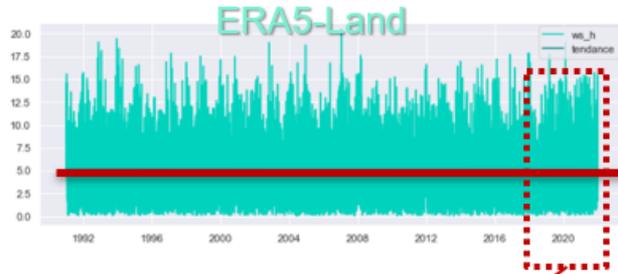
- Comment intégrer le changement climatique ? (1)

Ajustement des projections climatiques



- Comment intégrer le changement climatique ? (2)

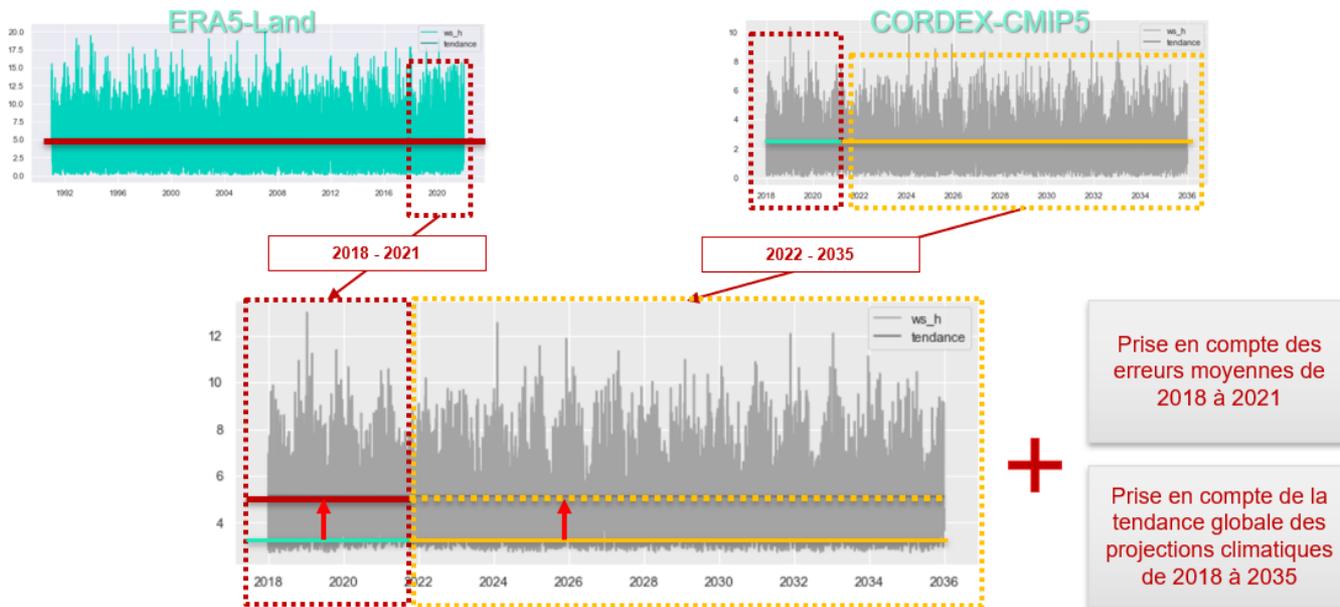
Ajustement des projections climatiques



Augmenter la tendance de la série temporelle CORDEX
au niveau de celle d'ERA5-Land !

- Comment intégrer le changement climatique ? (3)

Ajustement des projections climatiques



- Comment intégrer le changement climatique ? (4)

On reprend la même méthode que l'approche historique.

1

Importation des 31 productions théoriques (1991-2021)

2

Détermination des seuils d'indemnisation

3

Déclenchements d'indemnisation dans le passé ?

4

Calcul des primes pures

5

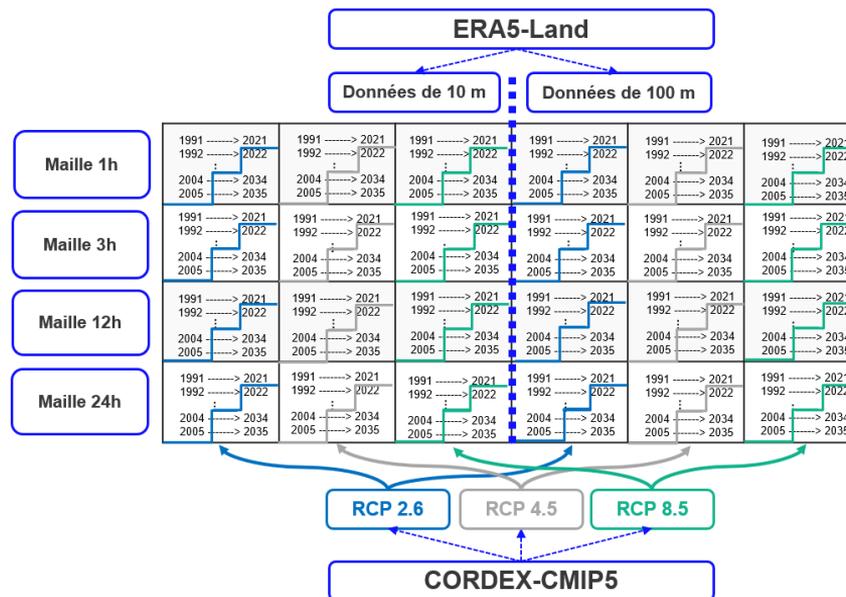
Part des primes pures sur le rendement moyen passé

- Comment intégrer le changement climatique ? (5)

Toutefois, la première étape est modifiée !

1

Importation des 31 productions théoriques (Fenêtre glissante)



- Conclusion des méthodes de tarification – Approche n° 1

Exemple : Parc n°3, Extrapolation depuis les données de 10 m, V= 16 %

Indicateurs	Maille 1h	Maille 3h	Maille 12h	Maille 24h
Rendement moyen	1 419 303 €	1 412 052 €	1 351 733 €	1 311 300 €
Seuil d'indemnisation	14 539 205 kWh ou 14,5 GWh	14 464 927 kWh ou 14,5 GWh	13 847 019 kWh ou 13,8 GWh	13 432 836 kWh ou 13,4 GWh
Prime pure	1 386 €	1 527 €	2 813 €	3 570 €

MAQUETTE TARIFAIRE DISPONIBLE :



Feuille de calcul
Microsoft Excel

- Conclusion des méthodes de tarification – Approche n° 2

Exemple : Parc n°3, Extrapolation depuis les données de 10 m, V= 16 %, RCP = 2.6, Période 1994 - 2024

Indicateurs	Maille 1h	Maille 3h	Maille 12h	Maille 24h
Rendement moyen	1 396 870 €	1 390 345 €	1 336 706 €	1 293 992€
Seuil d'indemnisation	14 309 402 kWh <i>ou 14,3 GWh</i>	14 242 556 kWh <i>ou 14,2 GWh</i>	13 693 087 kWh <i>ou 13,7 GWh</i>	13 255 533 kWh <i>ou 13,3 GWh</i>
Prime pure	949 €	882 €	1 999 €	2 498 €

MAQUETTE TARIFAIRE DISPONIBLE :

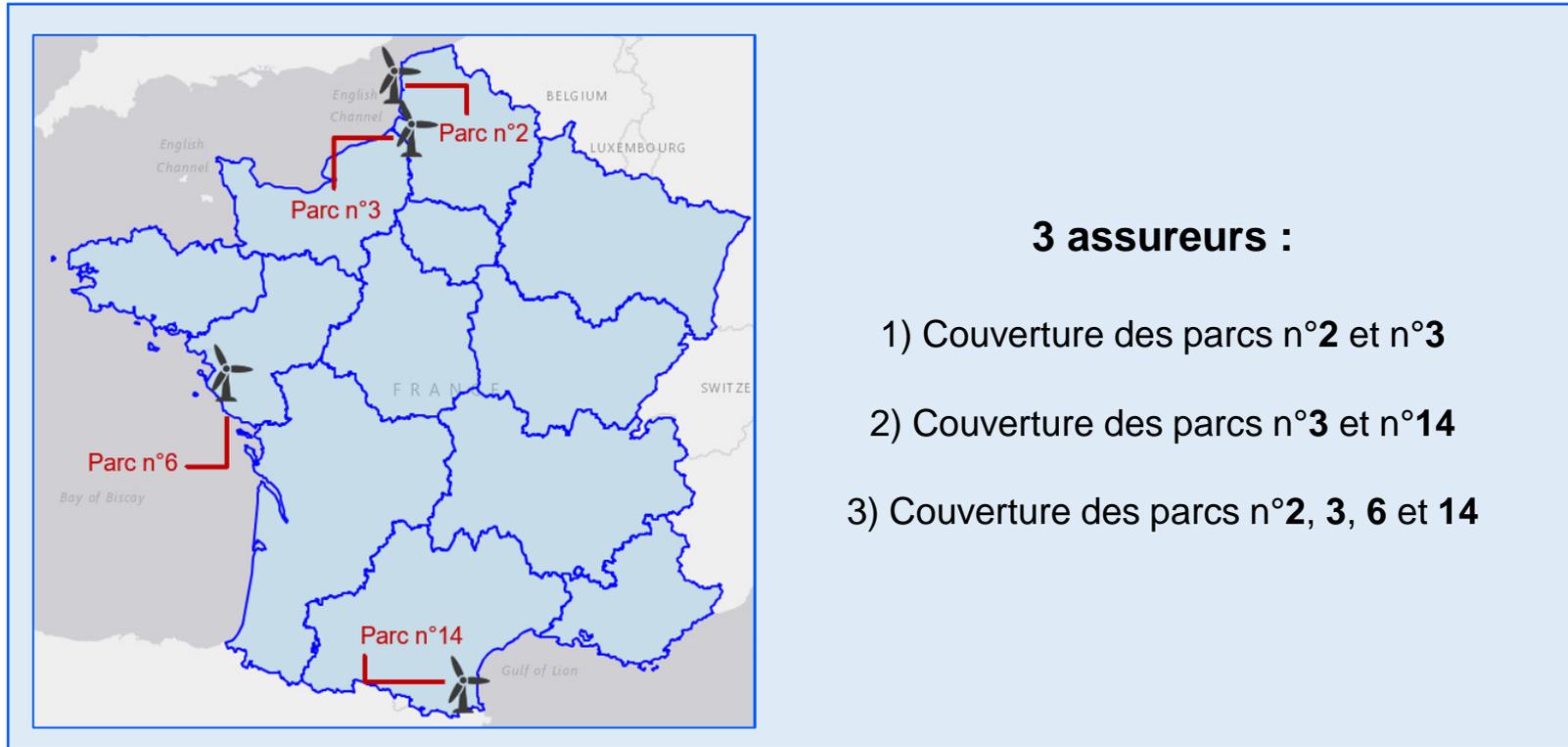


Feuille de calcul
Microsoft Excel

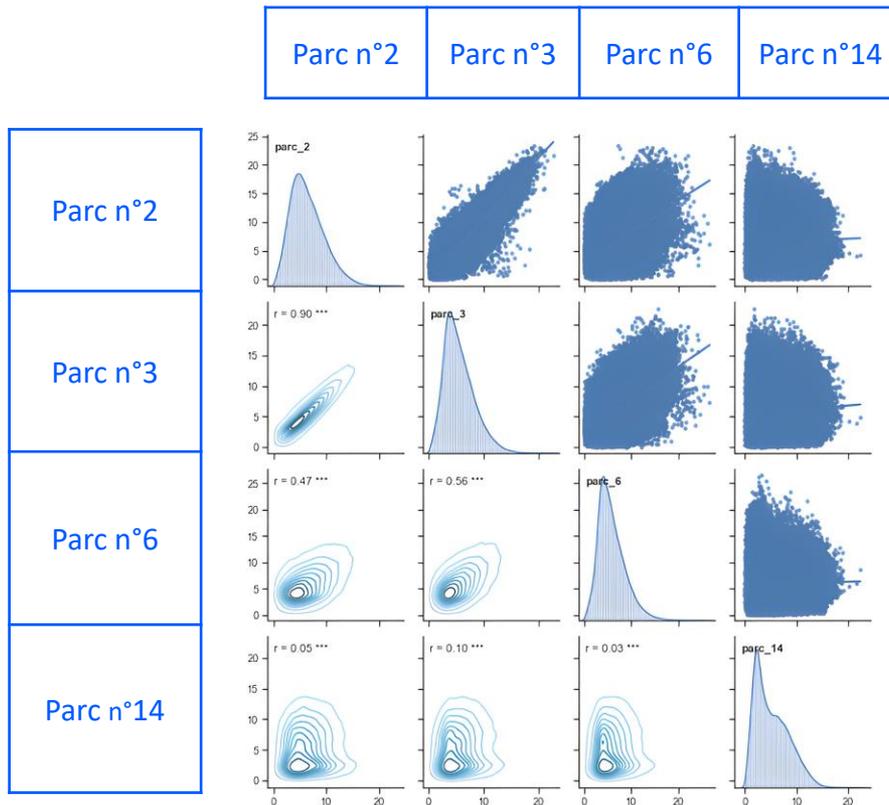
SOMMAIRE

- 1 • CONTEXTE & PROBLÉMATIQUE
- 2 • CONSTRUCTION DE L'INDICE & VARIABILITÉS
- 3 • MÉTHODES DE TARIFICATION
- 4 • DIVERSIFICATION GÉOGRAPHIQUE**
- 5 • AUTRES PERSPECTIVES D'ÉTUDE

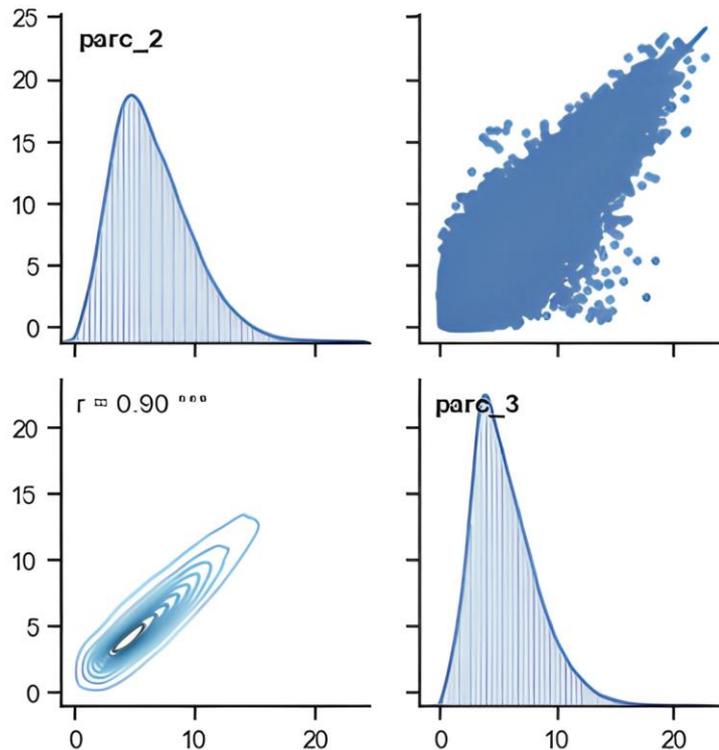
- Cas pratique



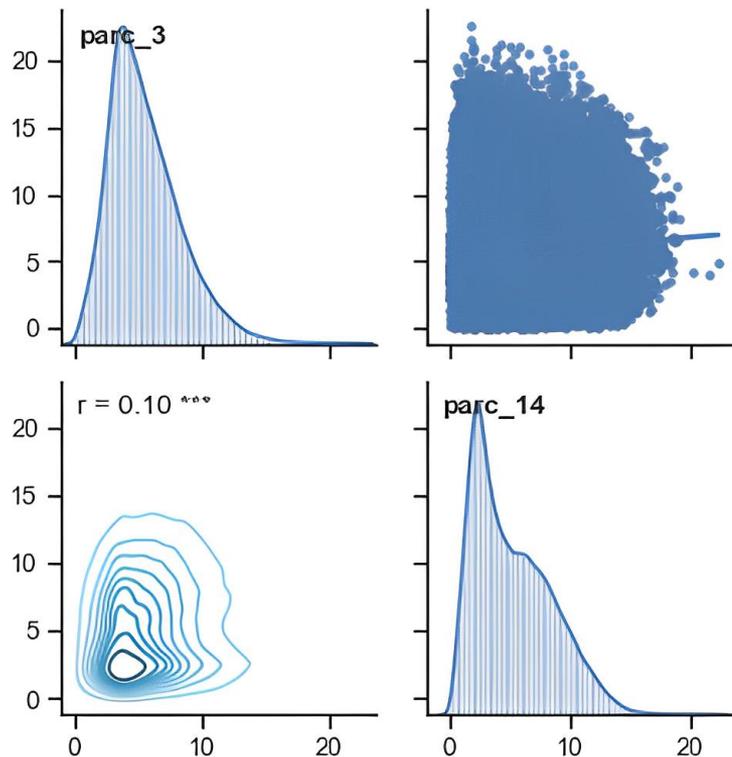
- La diversification géographique est-elle possible en France ?



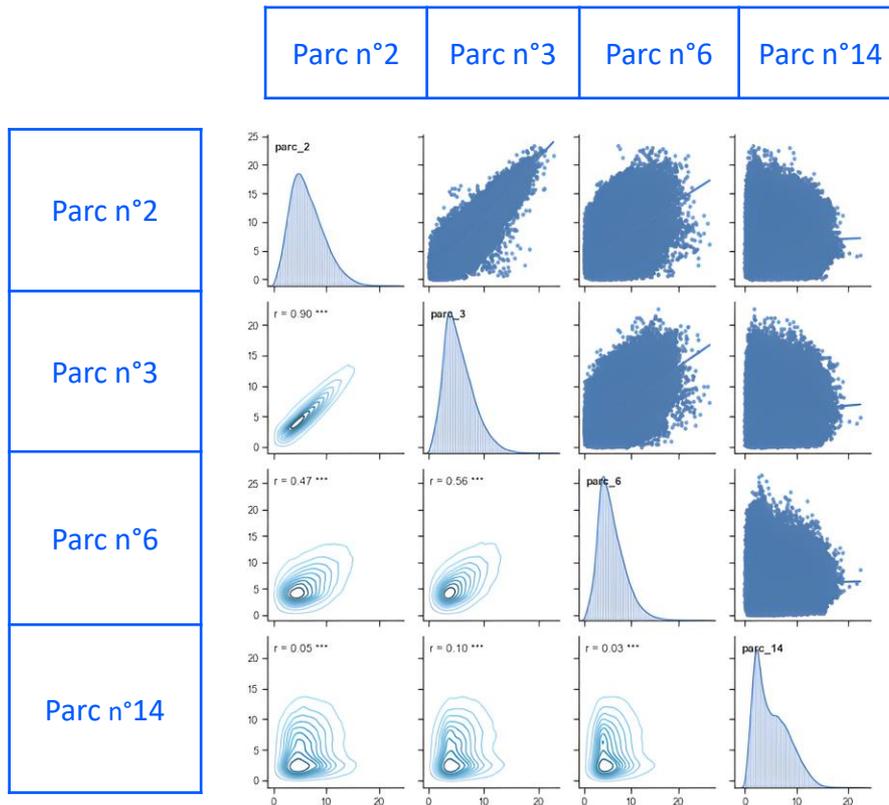
- La diversification géographique est-elle possible en France ?



- La diversification géographique est-elle possible en France ?



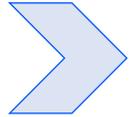
- La diversification géographique est-elle possible en France ?



SOMMAIRE

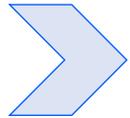
- 1 • CONTEXTE & PROBLÉMATIQUE
- 2 • CONSTRUCTION DE L'INDICE & VARIABILITÉS
- 3 • MÉTHODES DE TARIFICATION
- 4 • DIVERSIFICATION GÉOGRAPHIQUE
- 5 • AUTRES PERSPECTIVES D'ÉTUDE**

- Récapitulatif & Limites de l'étude



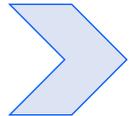
La maille 3h constitue un bon compromis entre optimisation du temps de calcul pour un assureur et représentativité du risque.

Existe-t-il une maille temporelle plus optimale entre 3H et 12H ?



L'étude ne se concentre que sur la volatilité des vitesses de vent.

Comment la tarification évoluerait si on intégrait la volatilité des prix de marché d'électricité?



L'étude de diversification géographique se limite à quelques parcs éoliens en France.

Il serait intéressant d'élargir l'étude à d'autres pays d'Europe.

Merci pour votre attention !
Avez-vous des questions ?