Le réseau de transport d'électricité

GT Producteurs et Stockeurs

12 mai 2025

Présentation externe

Copyright RTE – 2021. Ce document est la propriété de RTE. Toute communication, reproduction, publication même partielle est interdite sauf autorisation écrite du Gestionnaire du Réseau de Transport d'Électricité (RTE)

SOMMAIRE

1. Services systèmes tension

2. Evolution du CART Producteur

3. Décompte algorithmique Off-shore

4. Consultation sur les capacités constructives

1 Services Systèmes Tension

Objectifs

Réalisation de l'étude par l'école Centrale Supélec pilotée par RTE de septembre 2024 à avril 2025

Objectif de l'étude est de déterminer les coûts du réglage de la tension liés au surdimensionnement et aux pertes

Méthode

Modélisation d'un groupe nucléaire / groupe hydraulique / installation éolienne / installation photovoltaïque

Pour chacune de ces installations, dimensionnement suivant 3 configurations :

- Dimensionnement réactif nul : pas de réglage de la tension
- Dimensionnement conforme aux exigences règlementaires de l'arrêté de 2008 : plage de réactif [-0,35 Pmax ; 0,32 Pmax]
- Surdimensionnement par rapport aux exigences réglementaires : plages supérieures à [-0,35 Pmax ; 0,32 Pmax]

Pour chaque configuration, estimation :

- Des coûts d'investissement lié au dimensionnement des machines. Fourchette de prix €/kVA
- Des pertes de rendement liées à la fourniture/absorption de réactif.

Méthode

Choix des configs

- Nucléaire et TAC : alternateur à pôles lisses
- Hydraulique : alternateur à pôles saillants
- Eolien off/on shore & PV : interfaçage direct par onduleur

Dimension-nement Qmax

- Choix de 3 niveaux de Tan ϕ pour dimensionner l'installation en fourniture de réactif
- 0 (pas de réglage tension) / 0,32 (réglementation arrêté de 2008) / surdimensionnement à 0,5 0,7 et 1

Déterminati on Qmin

- Détermination des capacités d'absorption de réactif de l'installation en fonction de Qmax et des limites :
- d'angle interne (LAI) / d'intensité stator (LIS) ou onduleur / de tension onduleur

Calcul des pertes

- Elaboration de 3 monotones traduisant les niveaux de réactifs vus par les installations sur une année (issu de CDP Prod)
- Point de fonctionnement en puissance active choisi :
- Nucléaire et hydraulique : Pmax / Eolien & PV : Taux de charge x Pmax

Valorisation

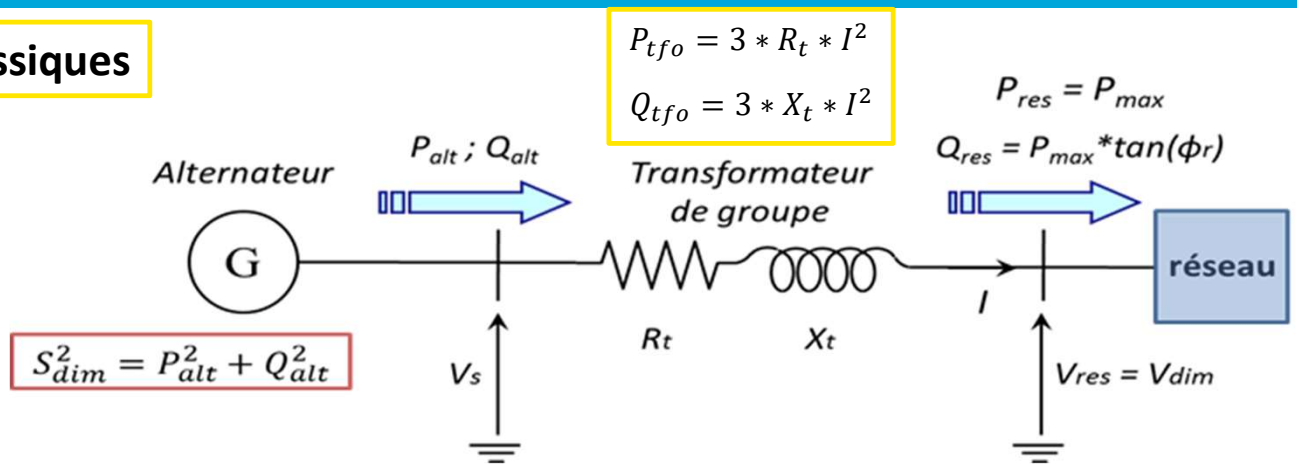
- Dimensionnement : fourchette de prix pour le coût d'investissement en €/kVA
- Pertes calculées en MWh sur une année valorisées sur la base de cotations

Modélisation

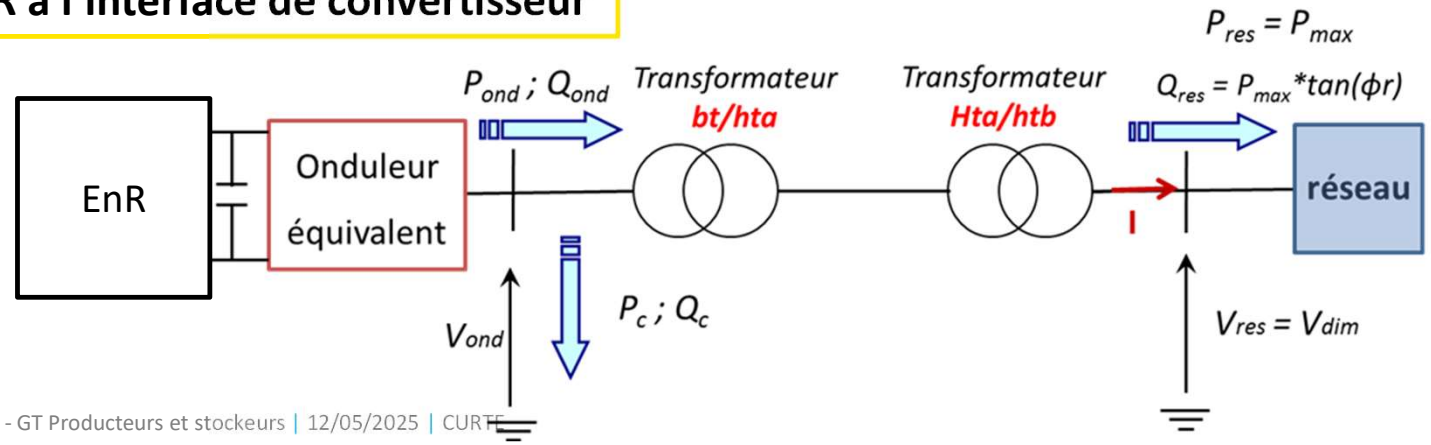
Alternateurs classiques

$$P_{tfo} = 3 * R_t * I^2$$

$$Q_{tfo} = 3 * X_t * I^2$$



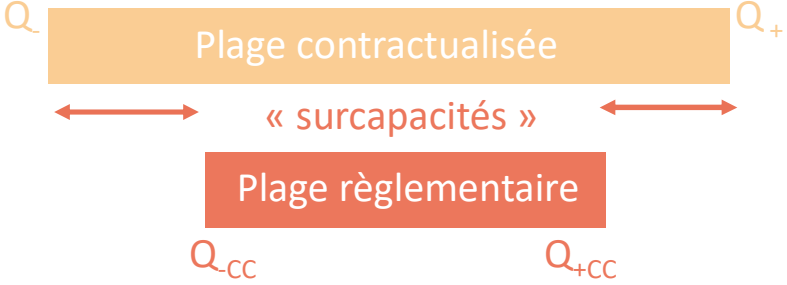
EnR à l'interface de convertisseur



Méthode de l'étude par l'école CentraleSupélec

Choix des tan φ au point de livraison (prise en compte du transformateur)

Objectif: Calcul du ΔS_{dim} pour déterminer le coût marginal de mise à disposition de la plage de réactif



Alternateur nucléaire ou hydraulique de Pmax = 50 MW

Installation		tan φ = 0	tan φ = 0,32	tan φ = 0,5	tan φ = 0,7	tan φ = 1
Puissance apparente (MVA)	S_{dim} MVA	50,5	54,7	59	65,2	76,3
	ΔS_{dim}	-4,2	0	4,3	10,5	21,6
Puissance réactive (Mvar)	Q_{dim} Mvar	5,6	21,7	31	41,5	57,4
	ΔQ_{dim}	-16,1	0	9,3	19,8	35,7

ENR via onduleur de Pmax = 50 MW

Installation		tan φ = 0	tan φ = 0,32	tan φ = 0,5	tan φ = 0,7	tan φ = 1
Puissance apparente (MVA)	S_{dim} MVA	50,7	54,9	59,2	65,5	77,1
	ΔS_{dim}	-4,2	0	4,3	10,6	22,2
Puissance réactive (Mvar)	Q_{dim} Mvar	5,7	21,8	31,2	41,8	58,2
	ΔQ_{dim}	-16,1	0	9,4	20,0	36,4

Valorisation du surdimensionnement

Surcoût (€) = Surdimensionnement (VA) x Coût (€/VA)

Alternateurs classiques

Surcoût de l'alternateur + surcoût du transformateur (€) =

Surdimensionnement ΔS_{dim} (VA) x Coût de l'alternateur (€/VA)
+ Surdimensionnement ΔS_{dim}(VA) x Coût du transformateur (€/VA)

EnR à l'interface de convertisseur

Surcoût de l'onduleur + surcoût du transformateur (€) =

Surdimensionnement ΔS_{dim} (VA) x Coût de l'onduleur (€/VA)
+ Surdimensionnement ΔS_{dim}(VA) x Coût du transformateur (€/VA)

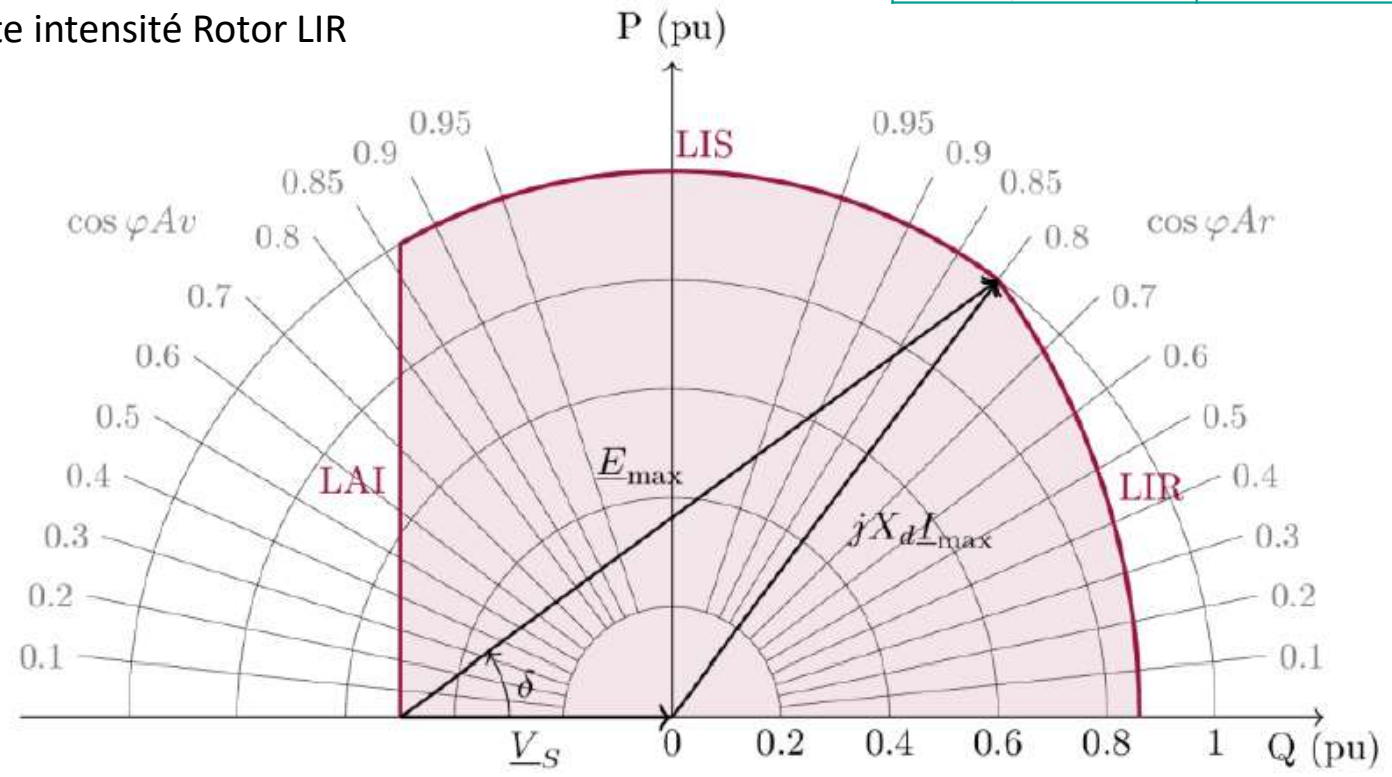
Capacités d'absorption

Alternateurs classiques

- Limite de stabilité LAI (Limitation d'Angle Interne)
- Limite du courant statorique LIS
- Limite intensité Rotor LIR

3 cas considérés:

Machine	$xd\ [pu]$	$xq\ [pu]$	Application type
M1 – pôles saillants	1,5	0,8	Hydraulique
M2 – pôles lisses	2	2	TAC, nucléaire 900
M3 – pôles lisses	2,81	2,81	Nucléaire 1500

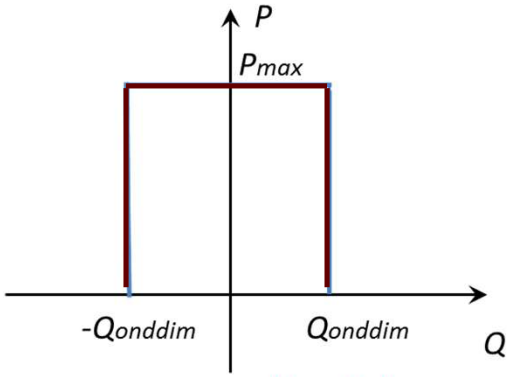


Capacités d'absorption

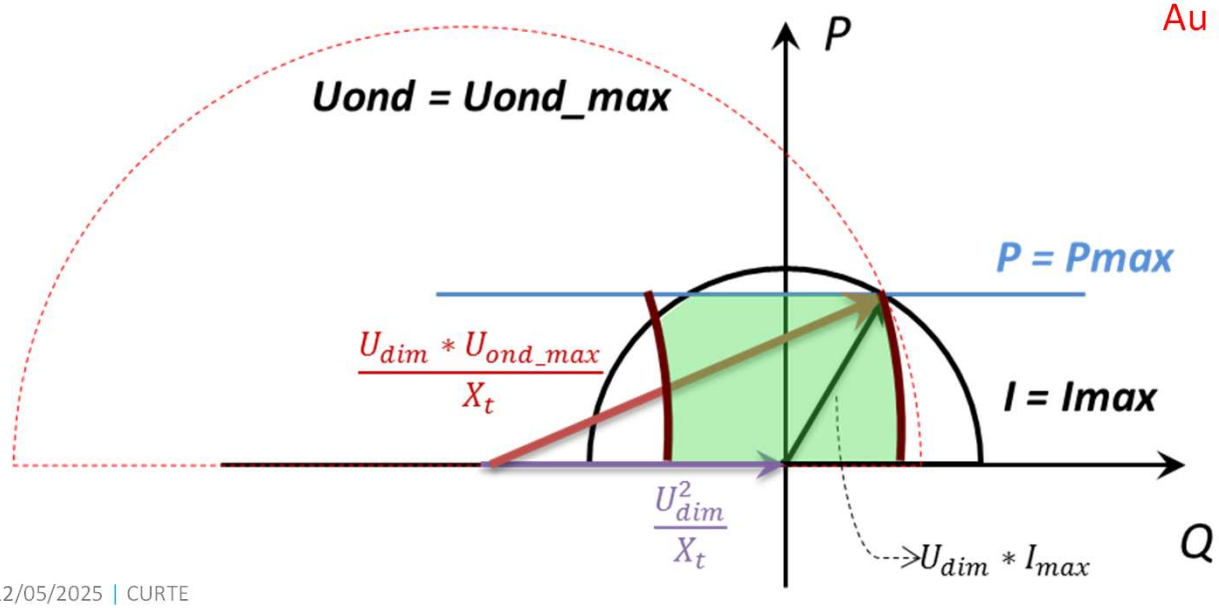
EnR à l'interface de convertisseur

Limite de l'onduleur vis-à-vis:

- La capacité d'absorption du réactif
- Le courant maximal Imax
- La tension maximale Uond_max



Au niveau d'onduleur



Capacités d'absorption

Détermination du Qmin => Résultats cohérents car capacité d'absorption supérieure à la fourniture

Type d'alternateur	tan φ = 0,32	tan φ = 0,5	tan φ = 0,7	tan φ = 1
M1-Hydro	-33,8 Mvar	-56,3 Mvar	-64,9 Mvar	-79,8 Mvar
M2-TAC	-35,3 Mvar	-37,5 Mvar	-40,5 Mvar	-46,3 Mvar
M3-Nucléaire	-26,6 Mvar	-28,0 Mvar	-30,1 Mvar	-34,1 Mvar

Limite en absorption de puissance réactive des groupes Qmin **LIS en violet** et **LAI en orange**

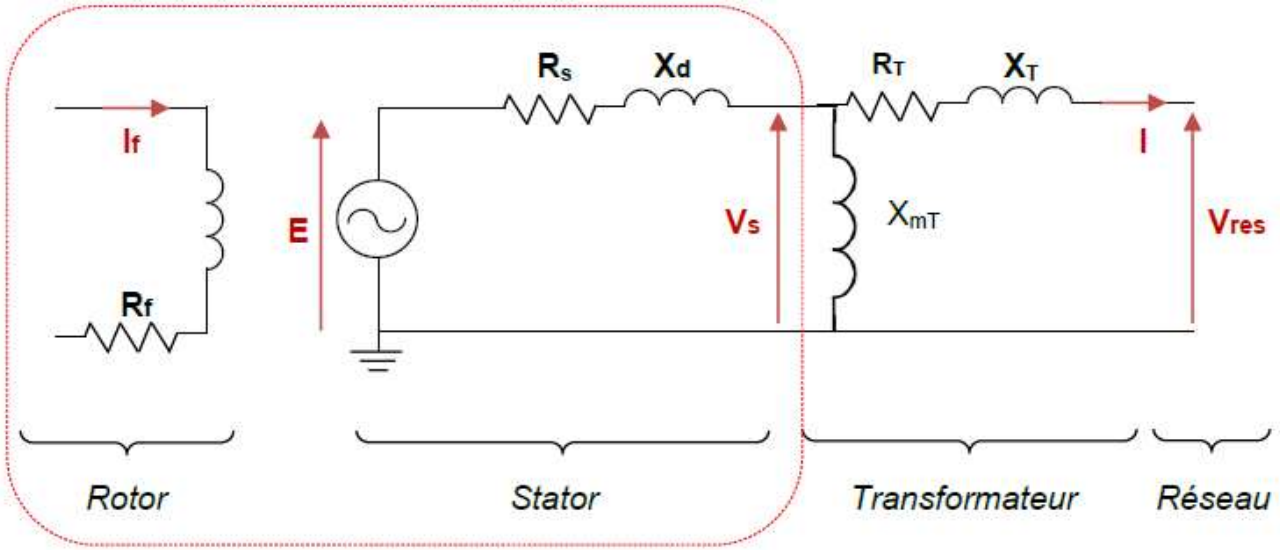
	tan φ = 0,32	tan φ = 0,5	tan φ = 0,7	tan φ = 1
ENR	-29,0 Mvar	-39,0 Mvar	-52,0 Mvar	-70,0 Mvar

Limite en absorption de puissance réactive des groupes Qmin **LPO** (limite en puissance onduleur) **en bleu** et **LIO** (Limite en intensité onduleur) **en rose**

Pertes - modèle

Alternateurs classiques

- Pour l'alternateur:
  - xd = 2.81;
  - Ifn = 2000 A;
  - rend = 0.987;
  - pstat = 29%;
  - prot = 20%;



La circulation d'une puissance réactive plus importante augmente les pertes dans l'alternateur et dans le transformateur du groupe.

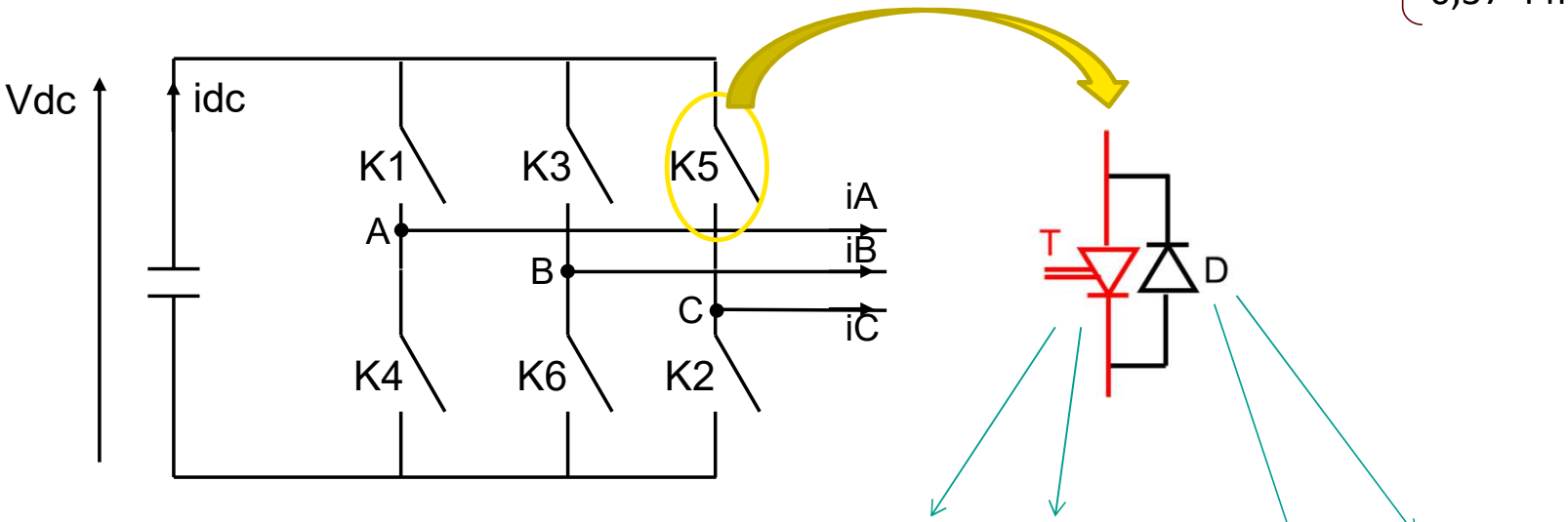
Pertes totales du groupe : $P_{tot} = PJ_s + PJ_r + P_F + PJ_{tfo}$

PJ_S: Perte Joule au stator
PJ_R: Pertes Joule au rotor
P_F : Pertes fer
PJ_{tfo} : Pertes transformateur

Pertes - modèle

EnR via onduleur

Pres = Pmoy = Taux de charge x Pmax =
- 0,12*Pmax pour PV
- 0,22*Pmax pour Eolien Onshore
- 0,37*Pmax pour Eolien Offshore



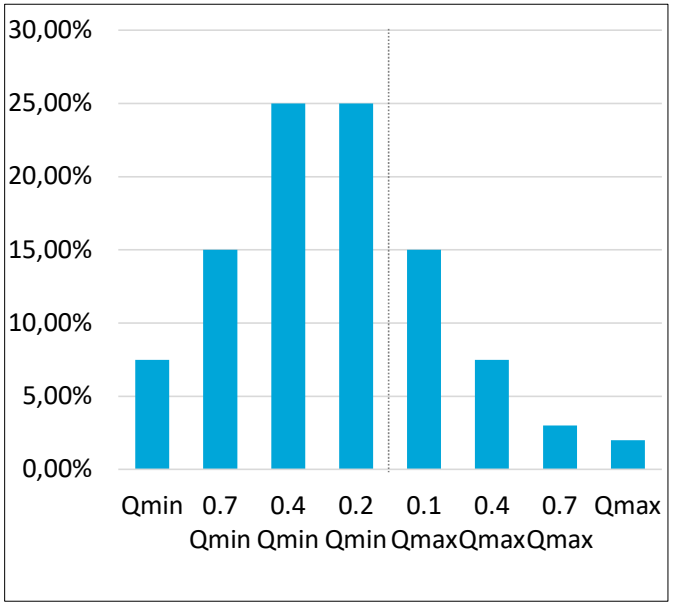
$$P_{ond} = N_{ondel} \cdot 6 \cdot \left(P_{cond(T)} + P_{sw(T)} + P_{cond(D)} + P_{sw(D)}\right)$$

Pertes totales du groupe : $P_{tot} = P_{ond} + PJ_{câble} + PJ_{tfo}$

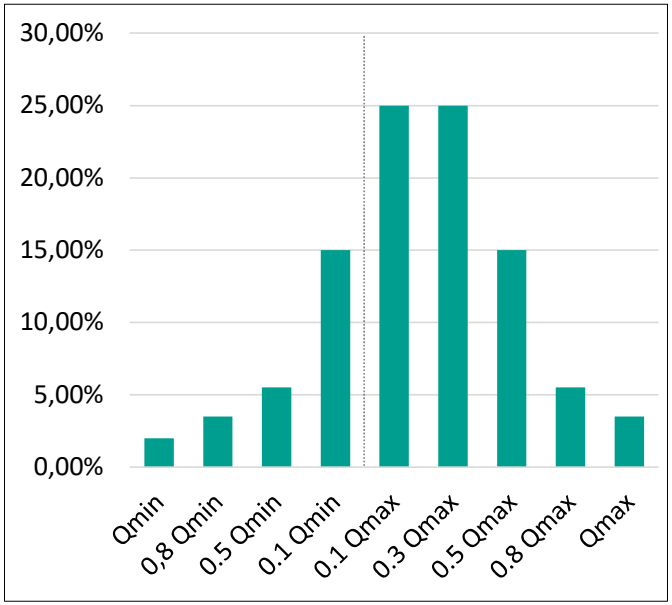
P_{ond}: Perte Onduleur
$PJ_{câble}$: Pertes Joule des câbles
PJ_{tfo} : Pertes transformateur

Pertes - modèle

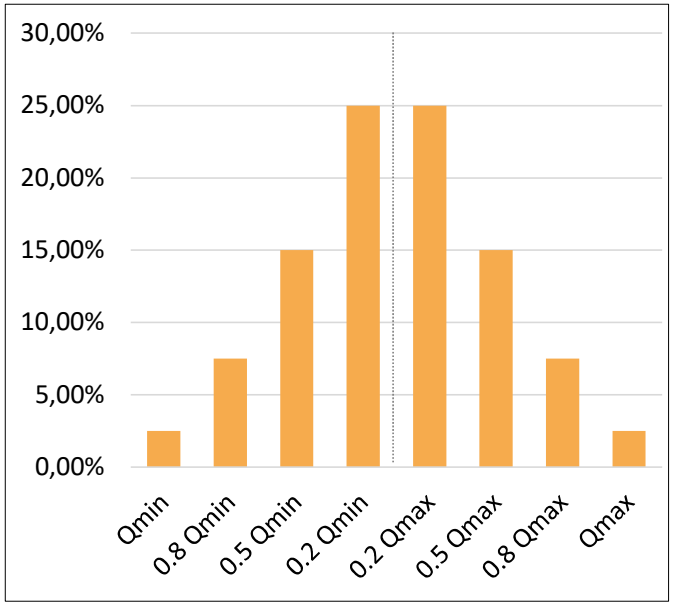
3 Histogrammes de réactif considérés pour le calcul des pertes (MWh)



Histogramme n°1
(centré à Q = 0,3*Qmin)



Histogramme n°2
(centré à Q = 0,2*Qmax)



Histogramme n°3
(centré à Q = 0)

Pertes - résultats

Alternateurs classiques – M1- Hydraulique

Type d'alternateur	Pertes d'énergie en MWh	tan φ = 0,32	tan φ = 0,5	tan φ = 0,7	tan φ = 1
M1-Hydraulique	Qres = 0	6 141,5	5 788,5	5 410,5	4 933,0
	Histogramme 1 - centrage sur 0,3 Qmin	6 332,8	6 356,2	6 106,6	5 830,3
	Histogramme 2- centrage sur 0,2 Qmax	6 272,4	6 085,0	5 809,2	5 484,3
	Histogramme 3 - centrage sur 0	6 307,9	6 223,7	5 973,0	5 689,2

Pertes dues au réglage de tension = différence entre les pertes avec le réglage de tension (histogramme 1,2 & 3) avec les pertes à réactif nul

Pertes supplémentaires en MWh Par histogramme – Qres=0		tan φ = 0,32	tan φ = 0,5	tan φ = 0,7	tan φ = 1
M1-Hydraulique	Histogramme 1 - centrage sur 0,3 Qmin	191,3 (0,1%)	567,7 (0,2%)	696,1 (0,2%)	897,3 (0,3%)
	Histogramme 2- centrage sur 0,2 Qmax	130,9 (0,0%)	296,5 (0,1%)	398,7 (0,1%)	551,3 (0,2%)
	Histogramme 3 - centrage sur 0	166,4 (0,1%)	435,2 (0,1%)	562,5 (0,2%)	756,2 (0,3%)

Pertes supp. liées au surdimensionnement en MWh: Qres = 0	tan φ = 0,32	tan φ = 0,5	tan φ = 0,7	tan φ = 1
M1-Hydraulique	0	-353,0 (-0,1%)	-731,0 (-0,2%)	-1 208,5 (-0,4%)

% d'énergie active annuelle avec un taux de disponibilité moyen de 70% d'une centrale de 50 MW

Pertes - résultats

Alternateurs classiques – M2- TAC

Type d'alternateur	Pertes d'énergie en MWh	tan φ = 0,32	tan φ = 0,5	tan φ = 0,7	tan φ = 1
M2- TAC	Qres = 0	6 171,6	5 805,9	5 416,4	4 926,5
	Histogramme 1 - centrage sur 0,3 Qmin	6 394,5	6 059,8	5 707,0	5 274,7
	Histogramme 2- centrage sur 0,2 Qmax	6 312,0	6 011,3	5 698,0	5 319,9
	Histogramme 3 - centrage sur 0	6 357,4	6 053,1	5 735,8	5 353,5

Pertes dues au réglage de tension = différence entre les pertes avec le réglage de tension (histogramme 1,2 & 3) avec les pertes à réactif nul

Pertes supplémentaires en MWh Par histogramme – Qres=0		tan φ = 0,32	tan φ = 0,5	tan φ = 0,7	tan φ = 1
M2- TAC	Histogramme 1 - centrage sur 0,3 Qmin	222,9 (0,1%)	253,9 (0,1%)	290,6 (0,1%)	348,2 (0,1%)
	Histogramme 2- centrage sur 0,2 Qmax	140,4 (0,1%)	205,4 (0,1%)	281,6 (0,1%)	393,4 (0,1%)
	Histogramme 3 - centrage sur 0	185,8 (0,1%)	247,2 (0,1%)	319,4 (0,1%)	427,0 (0,1%)

Pertes supp. liées au surdimensionnement en MWh: Qres = 0	tan φ = 0,32	tan φ = 0,5	tan φ = 0,7	tan φ = 1
M2- TAC	0	-365,7 (-0,1%)	-755,2 (-0,3%)	-1 245,1 (-0,4%)

% d'énergie active annuelle avec un taux de disponibilité moyen de 70% d'une centrale de 50 MW

Pertes - résultats

Alternateurs classiques – M3- Nucléaire

Type d'alternateur	Pertes d'énergie en MWh	tan φ = 0,32	tan φ = 0,5	tan φ = 0,7	tan φ = 1
M3- Nucléaire	Qres = 0	6 214,5	5 836,0	5 433,6	4 928,8
	Histogramme 1 - centrage sur 0,3 Qmin	6 343,4	5 991,1	5 619,6	5 162,1
	Histogramme 2- centrage sur 0,2 Qmax	6 325,3	6 010,9	5 683,6	5 288,8
	Histogramme 3 - centrage sur 0	6 343,1	6 023,4	5 690,1	5 287,5

Pertes dues au réglage de tension = différence entre les pertes avec le réglage de tension (histogramme 1,2 & 3) avec les pertes à réactif nul

Pertes supplémentaires en MWh Par histogramme – Qres=0		tan φ = 0,32	tan φ = 0,5	tan φ = 0,7	tan φ = 1
M3- Nucléaire	Histogramme 1 - centrage sur 0,3 Qmin	128,9 (0,0%)	155,1 (0,1%)	186,0 (0,1%)	233,3 (0,1%)
	Histogramme 2- centrage sur 0,2 Qmax	110,8 (0,0%)	174,9 (0,1%)	250,0 (0,1%)	360,0 (0,1%)
	Histogramme 3 - centrage sur 0	128,6 (0,0%)	187,4 (0,1%)	256,5 (0,1%)	358,7 (0,1%)

Pertes supp. liées au surdimensionnement en MWh: Qres = 0	tan φ = 0,32	tan φ = 0,5	tan φ = 0,7	tan φ = 1
M3- Nucléaire	0	-378,5 (-0,1%)	-780,9 (-0,3%)	-1 285,7 (-0,4%)

% d'énergie active annuelle avec un taux de disponibilité moyen de 70% d'une centrale de 50 MW

Pertes - résultats

EnR via onduleur - PV avec Pres = 12%Pmax

Type d'alternateur	Pertes d'énergie en MWh	tan φ = 0,32	tan φ = 0,5	tan φ = 0,7	tan φ = 1
PV avec Pres = 12%Pmax	Qres = 0	461,5	461,2	461,0	462,9
	Histogramme 1 - centrage sur 0,3 Qmin	1 139,3	1 562,6	2 105,4	2 906,8
	Histogramme 2- centrage sur 0,2 Qmax	797,2	1 068,2	1 419,2	1 978,3
	Histogramme 3 - centrage sur 0	989,4	1 364,4	1 847,2	2 589,1

Pertes dues au réglage de tension = différence entre les pertes avec le réglage de tension (histogramme 1,2 & 3) avec les pertes à réactif nul

Pertes supplémentaires en MWh Par histogramme – Qres=0		tan φ = 0,32	tan φ = 0,5	tan φ = 0,7	tan φ = 1
PV avec Pres = 12%Pmax	Histogramme 1 - centrage sur 0,3 Qmin	677,8 (1,3%)	1 101,4 (2,1%)	1 644,4 (3,1%)	2 443,9 (4,6%)
	Histogramme 2- centrage sur 0,2 Qmax	335,7 (0,6%)	607,0 (1,2%)	958,2 (1,8%)	1 515,4 (2,9%)
	Histogramme 3 - centrage sur 0	527,9 (1,0%)	903,2 (1,7%)	1 386,2 (2,6%)	2 126,2 (4,0%)

Pertes supp. liées au surdimensionnement en MWh: Qres = 0	tan φ = 0,32	tan φ = 0,5	tan φ = 0,7	tan φ = 1
PV avec Pres = 12%Pmax	0	-0,3 (0,0%)	-0,5 (0,0%)	1,4 (0,0%)

% d'énergie active annuelle avec un taux de charge de 12% d'une centrale de 50 MW

Pertes - résultats

EnR via onduleur - Eolien Onshore avec Pres = 22%Pmax

Type d'alternateur	Pertes d'énergie en MWh	tan φ = 0,32	tan φ = 0,5	tan φ = 0,7	tan φ = 1
Eolien Onshore avec Pres = 22%Pmax	Qres = 0	887,6	880,4	872,3	863,6
	Histogramme 1 - centrage sur 0,3 Qmin	1 461,9	1 849,7	2 360,1	3 124,8
	Histogramme 2- centrage sur 0,2 Qmax	1 163,0	1 399,2	1 717,5	2 237,2
	Histogramme 3 - centrage sur 0	1 325,4	1 660,9	2 107,7	2 808,2

Pertes dues au réglage de tension = différence entre les pertes avec le réglage de tension (histogramme 1,2 & 3) avec les pertes à réactif nul

Pertes supplémentaires en MWh Par histogramme – Qres=0		tan φ = 0,32	tan φ = 0,5	tan φ = 0,7	tan φ = 1
Eolien Onshore avec Pres = 22%Pmax	Histogramme 1 - centrage sur 0,3 Qmin	574,3 (0,6%)	969,3 (1,0%)	1 487,8 (1,5%)	2 261,2 (2,3%)
	Histogramme 2- centrage sur 0,2 Qmax	275,4 (0,3%)	518,8 (0,5%)	845,2 (0,9%)	1 373,6 (1,4%)
	Histogramme 3 - centrage sur 0	437,8 (0,5%)	780,5 (0,8%)	1 235,4 (1,3%)	1 944,6 (2,0%)

Pertes supp. liées au surdimensionnement en MWh: Qres = 0	tan φ = 0,32	tan φ = 0,5	tan φ = 0,7	tan φ = 1
Eolien Onshore avec Pres = 22%Pmax	0	-7,2 (0,0%)	-15,3 (0,0%)	-24,0 (-0,0%)

% d'énergie active annuelle avec un taux de charge de 22% d'une centrale de 50 MW

Pertes - résultats

EnR via onduleur - Eolien Offshore avec Pres = 37%Pmax

Type d'alternateur	Pertes d'énergie en MWh	tan φ = 0,32	tan φ = 0,5	tan φ = 0,7	tan φ = 1
Eolien Offshore avec Pres = 37%Pmax	Qres = 0	1 655,4	1 628,0	1 597,3	1 556,1
	Histogramme 1 - centrage sur 0,3 Qmin	2 140,1	2 472,3	2 925,8	3 619,3
	Histogramme 2- centrage sur 0,2 Qmax	1 884,6	2 072,5	2 339,6	2 790,7
	Histogramme 3 - centrage sur 0	2 020,1	2 299,3	2 687,5	3 312,7

Pertes dues au réglage de tension = différence entre les pertes avec le réglage de tension (histogramme 1,2 & 3) avec les pertes à réactif nul

Pertes supplémentaires en MWh Par histogramme – Qres=0		tan φ = 0,32	tan φ = 0,5	tan φ = 0,7	tan φ = 1
Eolien Offshore avec Pres = 37%Pmax	Histogramme 1 - centrage sur 0,3 Qmin	484,7 (0,3%)	844,3 (0,5%)	1 328,5 (0,8%)	2 063,2 (1,3%)
	Histogramme 2- centrage sur 0,2 Qmax	229,2 (0,1%)	444,5 (0,3%)	742,3 (0,5%)	1 234,6 (0,8%)
	Histogramme 3 - centrage sur 0	364,7 (0,2%)	671,3 (0,4%)	1 090,2 (0,7%)	1 756,6 (1,1%)

Pertes supp. liées au surdimensionnement en MWh: Qres = 0	tan φ = 0,32	tan φ = 0,5	tan φ = 0,7	tan φ = 1
Eolien Offshore avec Pres = 37%Pmax	0	-27,4 (-0,0%)	-58,1 (-0,0%)	-99,3 (-0,0%)

% d'énergie active annuelle avec un taux de charge de 37% d'une centrale de 50 MW

Couverture des coûts associés au réglage

Par an en M€	Basse	Haute
Pertes liées au réglage de la tension		
Coût de Maintenance lié au réglage		
Part d'investissement liée au Surdimensionnement (alternateur / onduleur et transformateur)		
Gains liés à la diminution des pertes grâce au surdimensionnement		
Coût des régulateurs de tension		
Total	**80**	**130**

Estimations réalisées sur la base du parc de réglage de tension à fin 2024 contractualisé: 93 GW, Q+: 39 Gvar et Q-: -49 Gvar

Variables structurantes :

- Durée de vie des matériels en nombre d'années
- Coût alternateur en k€/MVA
- Coût onduleur en k€/MVA
- Coût transformateur en k€/MVA
- Coût des régulateurs de tension en k€ par groupe
- Coût de maintenance pour 100 MW en k€/an
- Part de maintenance liée au réglage de la tension en %



Besoin de travailler ensemble pour affiner les hypothèses du futur niveau