



INSTITUT
D'ÉCONOMIE
INDUSTRIELLE



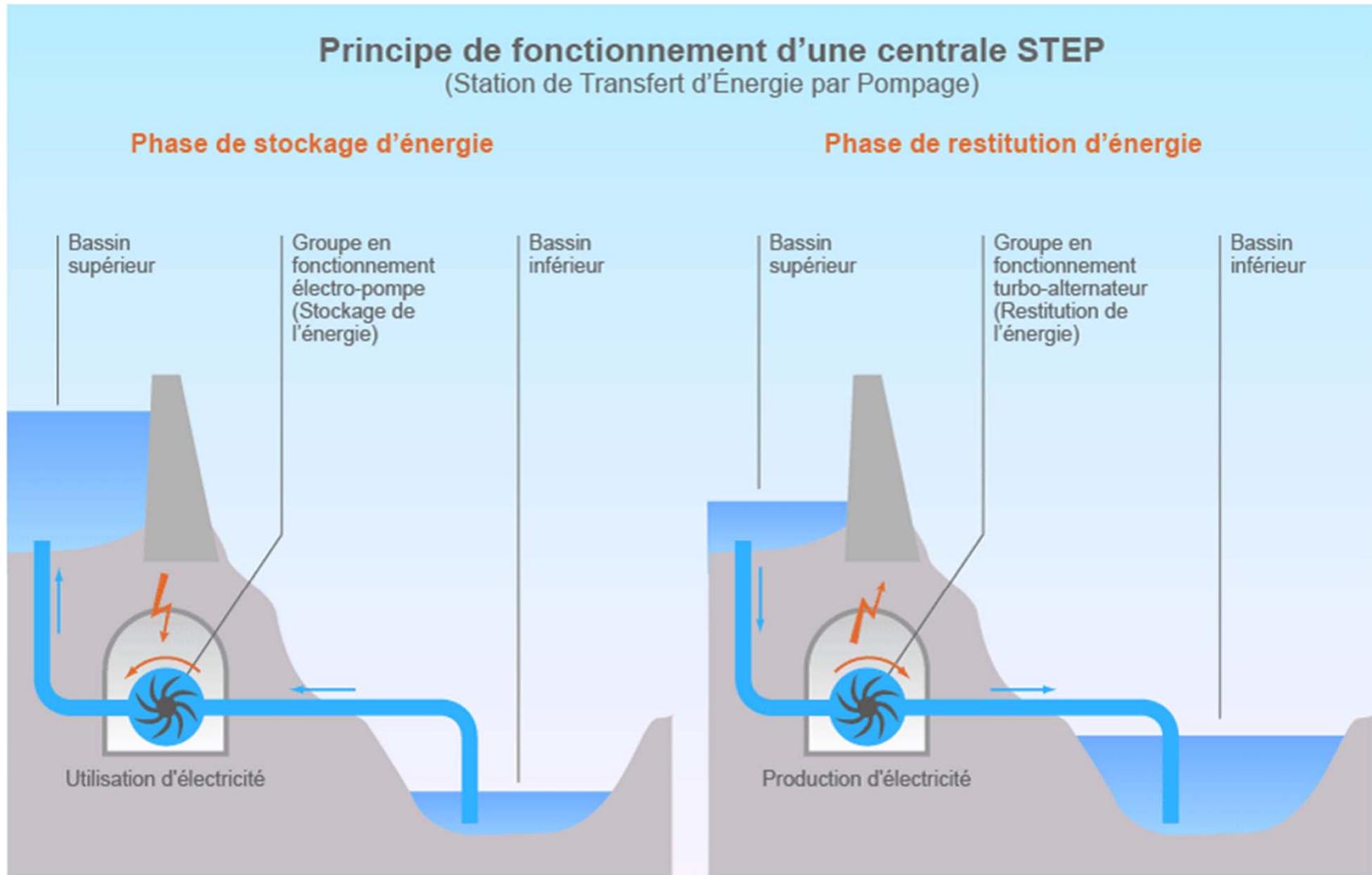
Toulouse
School
of Economics

Les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP)

Claude Crampes (claude.crampes@tse-fr.eu)

Genève, novembre 2014

1. Principes techniques et économiques



Couverture de la demande d'énergie électrique 2013 (TWh)

	HYDRO AND OTHER	NUCLEAR	CLASSIC THERMAL	TOTAL NET GENERATION	PUMPED STORAGE CONSUMPTION	EXCHANGE BALANCE	DEMAND
Germany	143.6	92.1	336.0	571.8	7.5	-33.8	530.6
Austria	45.9	0.0	21.8	67.7	5.4	7.3	69.6
Belgium	10.8	40.6	26.9	78.3	1.8	9.6	86.2
Bulgaria	7.2	13.2	19.1	39.5	1.0	-6.2	32.2
Croatia	8.7	0.0	4.1	12.8	0.2	4.5	17.1
Slovakia	6.3	14.7		27.0	0.4	0.1	26.6
Slovenia	4.5	5.0		13.9	0.0	-1.2	12.7
Spain	113.2	54.2		273.7	6.0		
France	102.2	403.7		550.8	7.1		
Greece	12.1	0.0		47.5	0.1		
Netherlands	12.9	2.5		92.3	0.0		
Hungary	1.6	14.4		27.2	0.0	11.9	39.0
Italy	95.0	0.0		276.0	2.4	42.3	315.9
Luxembourg	1.4	0.0	1.3	2.8	1.5	4.9	6.2
Poland	15.1	0.0	135.7	150.9	0.8	-4.5	145.5
Portugal	29.5	0.0	18.3	47.8	1.5	2.8	49.2
Czech Republic	6.2	29.0	45.6	80.8	1.2	-16.9	62.7
Romania	20.2	10.7	23.6	54.5	0.2	-2.0	52.3

entre 70 et 80% de l'énergie consommée est restituée

électricité utilisée pour remonter de l'eau

Source: ENTSO-E, Spain REE.

Détail par filière de la production d'électricité française pour la journée du :

Mercredi 8 Février 2012

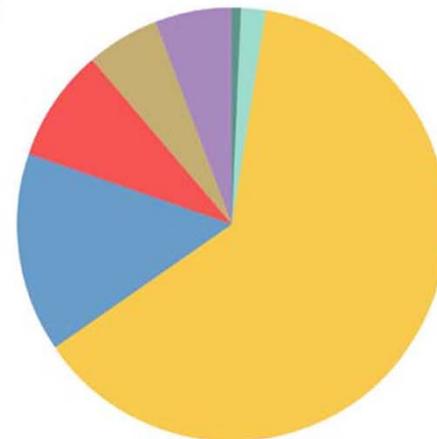
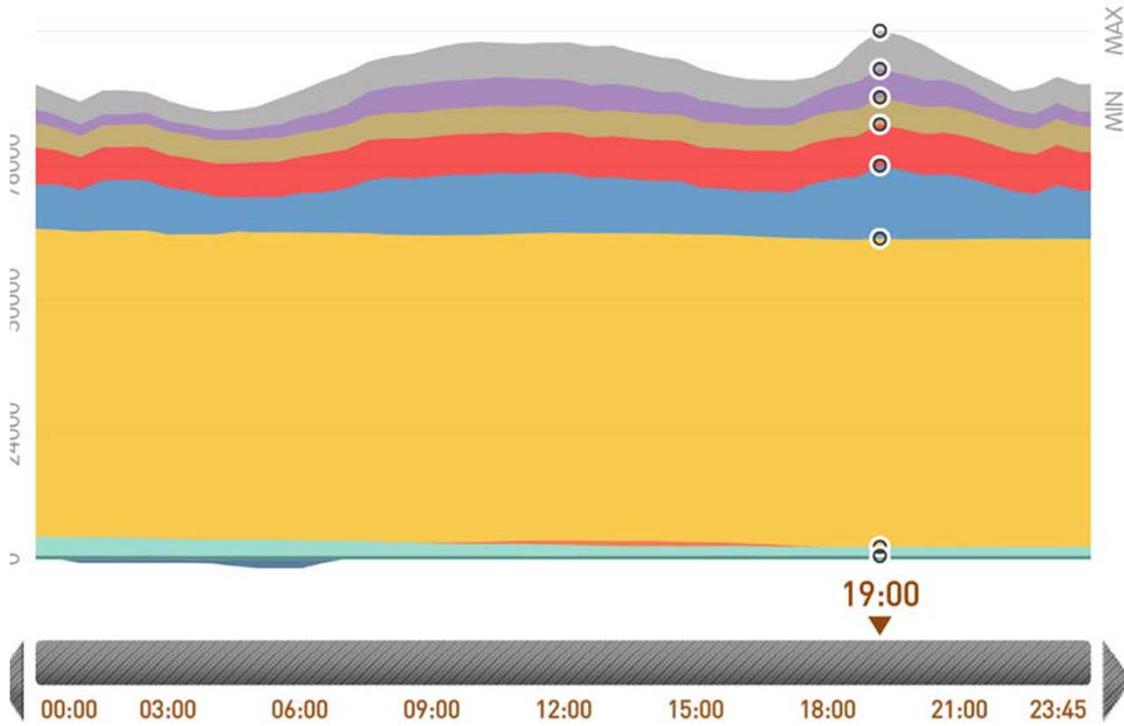


DONNÉES DÉFINITIVES

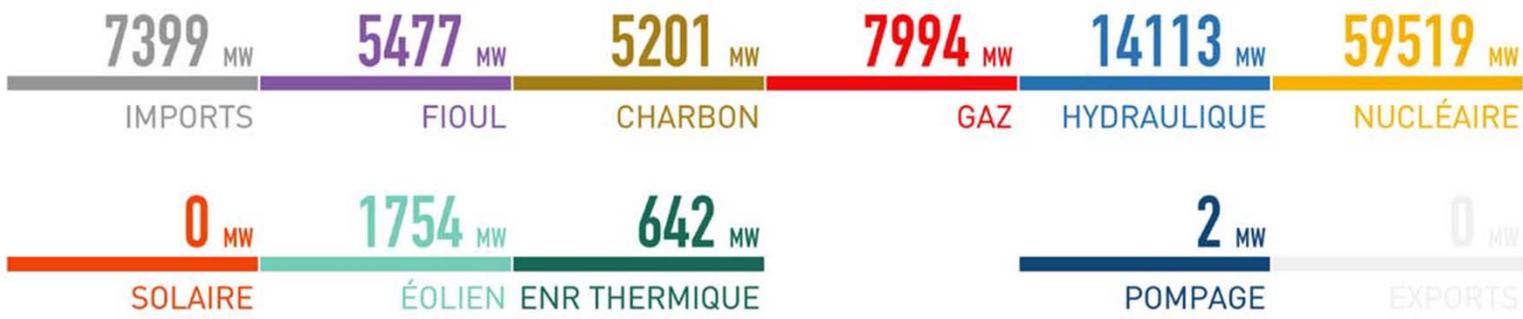
MASQUER LA RÉPARTITION

MINIMUM

MAXIMUM



www.rte-france.com/fr/eco2mix/eco2mix



Détail par filière de la production d'électricité française pour la journée du :

Mercredi 8 Février 2012



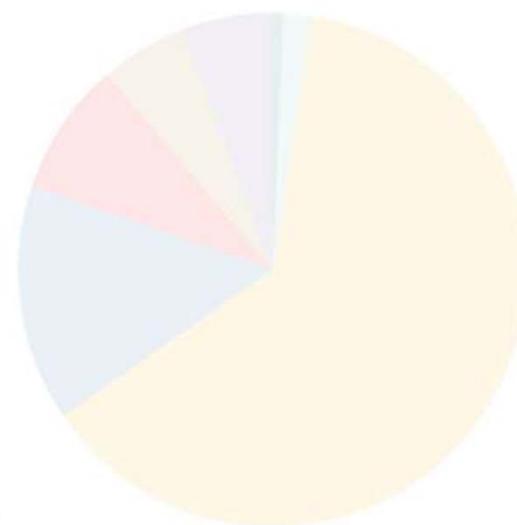
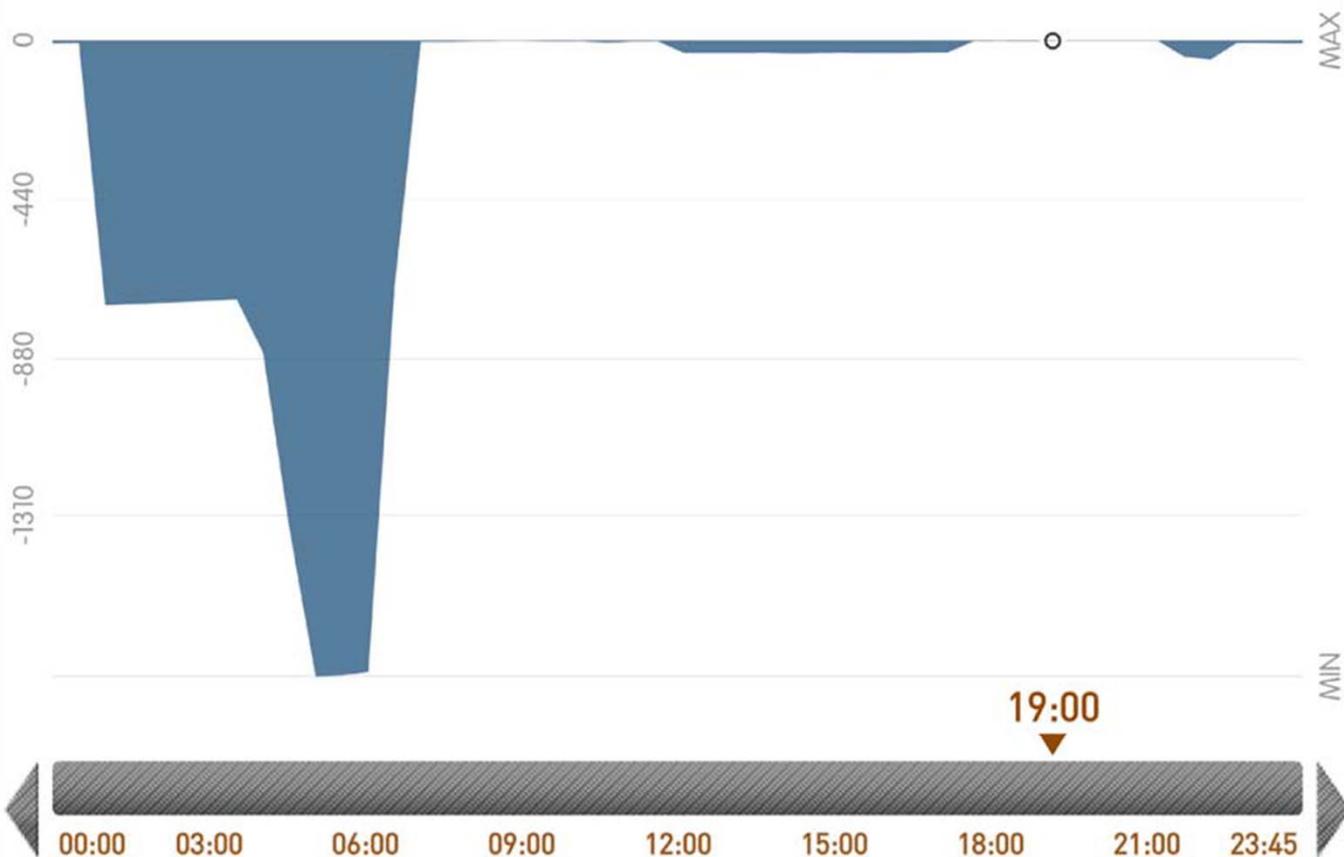
DONNÉES DÉFINITIVES

VOIR TOUTES LES FILIÈRES

MASQUER LA RÉPARTITION

MINIMUM

MAXIMUM



... turbinage en pointe ...

http://www.omel.es/es/pdfs/INFORME_MENSUAL_ENE_2008.pdf - Windows Internet Explorer

http://www.omel.es/es/pdfs/INFORME_MENSUAL_ENE_2008.pdf

Save a Copy Print Search Select 200%

Día	Hora																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
01/01/08	TER	TER	TER	BG HI TCC	BG	TER	TER	TCC	TER	TER	TER	TER	TER	TCC	TCC	TER	TER	TCC	TER	BG	TCC	BG	BG	TCC
02/01/08	AE	TCC	TER	TER	HI	AE	TER	TCC	TER	TCC	HI	HI	BG	HI	BG	HI	TCC	TCC	TCC	HI	TCC	TCC	TCC	TCC
03/01/08	TCC	TER	TER	TCC	TCC	TCC	TER	TCC	TER	HI	TCC	BG	BG	TCC	TCC	TER	TCC	TCC	TER	TER	TER	RE	AE	TCC
04/01/08	TCC	TCC	TCC	TER	TER	TER	TCC	TER	BG	TCC	HI	HI	BG	HI	BG	TCC	TCC	BG	TER	HI	HI	BG	AE	BG
05/01/08	CO	BG	TCC	TCC	TCC	AE	RE AE TCC	TCC	HI	TCC	HI	HI	BG	BG	TER	TCC	AE	HI	TCC	BG	BG	BG	BG	RE
06/01/08	TCC	AE	RE AE	TER	TCC	TCC	TCC	TER	TCC	HI	TCC	TCC	TER	TER	CO	TER	TCC	TER	CO	BG	TER	TER	HI	HI
07/01/08	TCC	TER	TER	TCC	TER	TCC	TCC	TCC	AE BG	TCC	RE BG TCC HI	BG	TER	TCC	BG	AE	BG	TCC	HI	TCC	TCC	HI	HI	TCC
08/01/08	TCC	TCC	TER	TCC	TCC	TER	TER	CO	HI	TER	TER	TCC	TCC	TCC	RE HI TCC BG AE	TCC	BG	TCC	HI BG RE	HI	HI	HI	TCC	BG
09/01/08	TCC	TCC	TCC	TER	TER	TCC	TCC	TCC	TCC	TCC	TCC	TCC	TCC	AE	CO	TER	BG	RE BG TCC	TCC	HI	TER	AE	TCC	BG
10/01/08	TCC	TCC	TCC	TER	TER	TER	TER	TCC	HI	TER	TCC	TCC	BG	AE	CO	TER	BG	RE BG TCC	TCC	HI	TCC	HI	TCC	BG
11/01/08	TER	TCC	TER	AE	TCC	TCC	TCC	TCC	AE RE BG	HI	TCC	HI	AE	TCC	TCC	TER	TCC	BG	BG	BG	TCC	BG	TCC	TCC
12/01/08	TER TCC	TCC	TER	TCC	TER	TER	TER	TCC	TER	AE TCC	BG	AE	AE	TER	TCC	TER	TCC	TCC	TER	BG	HI	BG	TER	BG

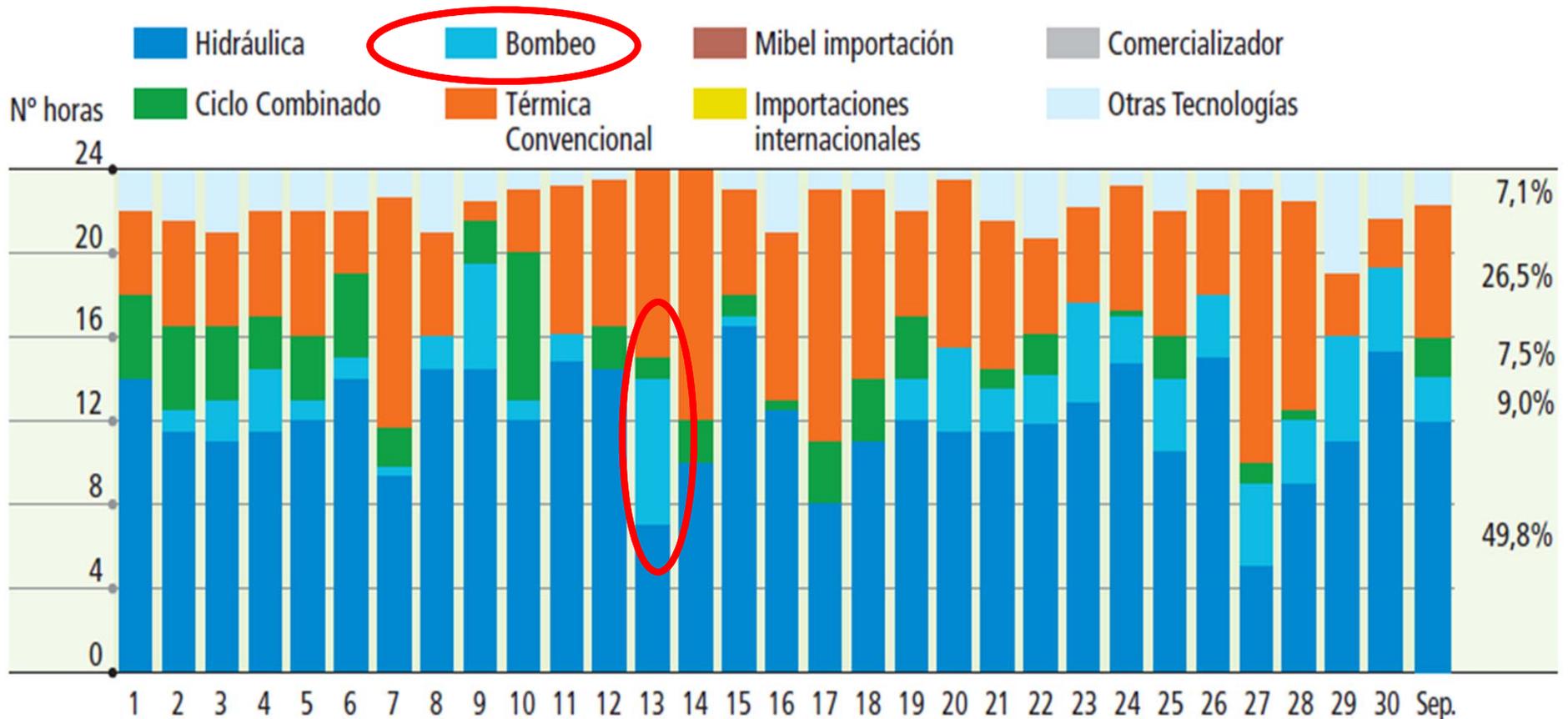
8,27 x 11,69 in 22 of 85

Terminé Zone inconnue

démarrer pumping février 2... slides Paris MAI 2... OMEL - Windows ... http://www.omel... 19:57

un acteur majeur sur les marchés

9.5 Mercado diario: participación de cada tecnología en la fijación del precio marginal



Fuente: OMIE

source: www.ree.es/sites/default/files/downloadable/ree_septiembre_2014.pdf

principales qualités 1

- C'est le **moyen de stockage le plus efficient**, notamment face à la montée en puissance de l'éolien et du photovoltaïque;
 - l'énergie stockée est de l'ordre de 10 GWh par STEP
 - c'est la technologie de stockage la plus mature (près d'un siècle), la moins onéreuse en terme de capital investi (par rapport aux batteries, à l'air comprimé, l'hydrogène) et en termes de rendement (de l'ordre de 80%);
 - à l'horizon 2030 (et la cible de 40% de renouvelables dans le mix énergétique), « *il n'existe pas de technologie de stockage équivalente aux STEP, en termes de capacité, de volume, de compétitivité et de rendement.* » (Union Française de l'Electricité)

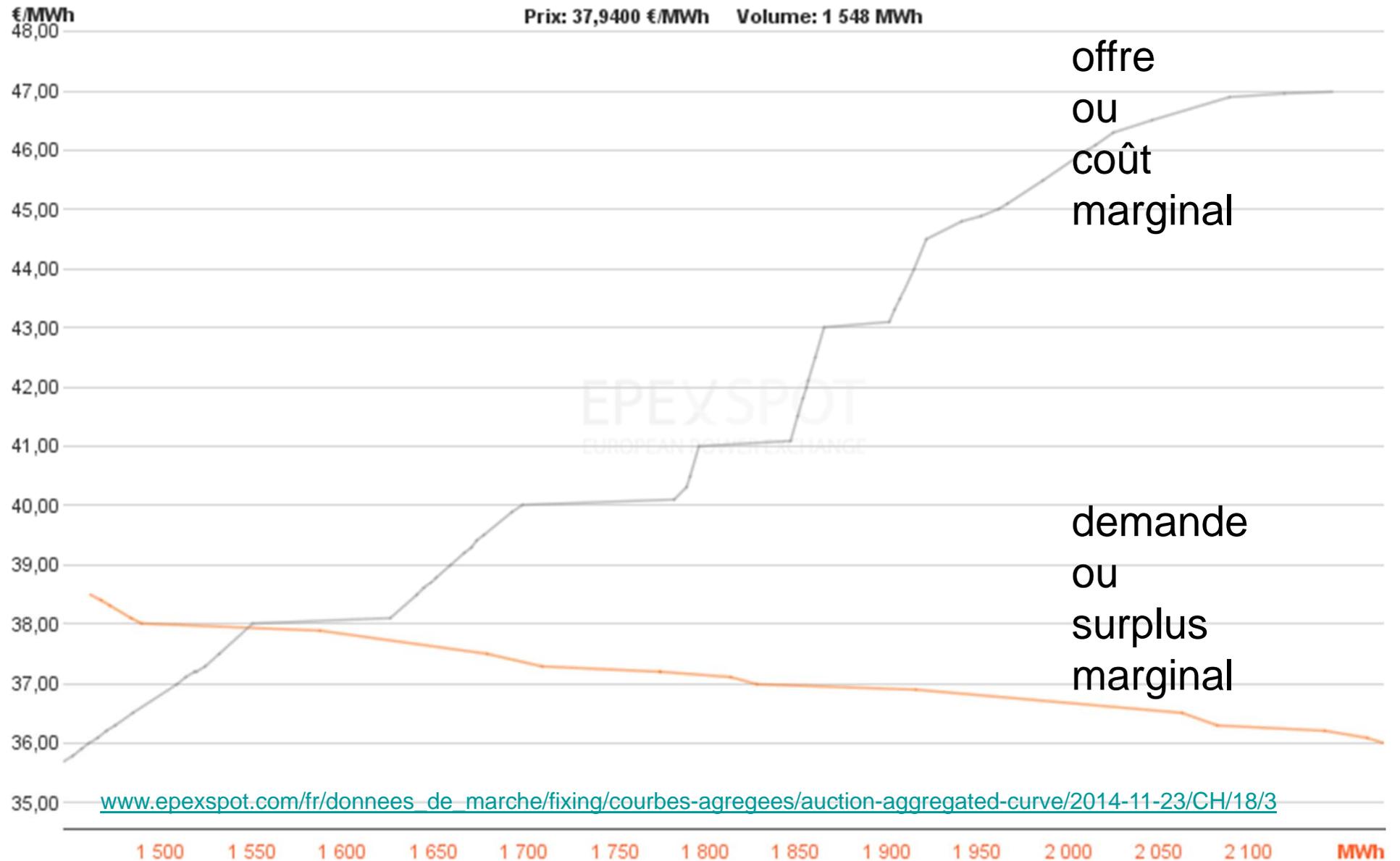
principales qualités 2

- **Très grande flexibilité** pour garantir la sécurité du système électrique:
 - comme producteur, elles peuvent répondre en quelques minutes à une sollicitation de la demande en énergie pour équilibrer le réseau électrique.
 - comme consommateur, elles peuvent absorber très rapidement l'électricité en excédent sur le réseau, évitant ainsi les tensions qui mettent en danger le maintien du système électrique. C'est un de leurs atouts par rapport aux autres moyens de production (Cycle Combiné Gaz ou Turbines A Combustion)
 - les STEP contribuent au réglage de la fréquence et au mécanisme d'ajustement: les 3 principales STEP françaises participent pendant 40% de leur temps de fonctionnement au mécanisme d'ajustement;
 - temps de réaction très courts: moins de 3 minutes.

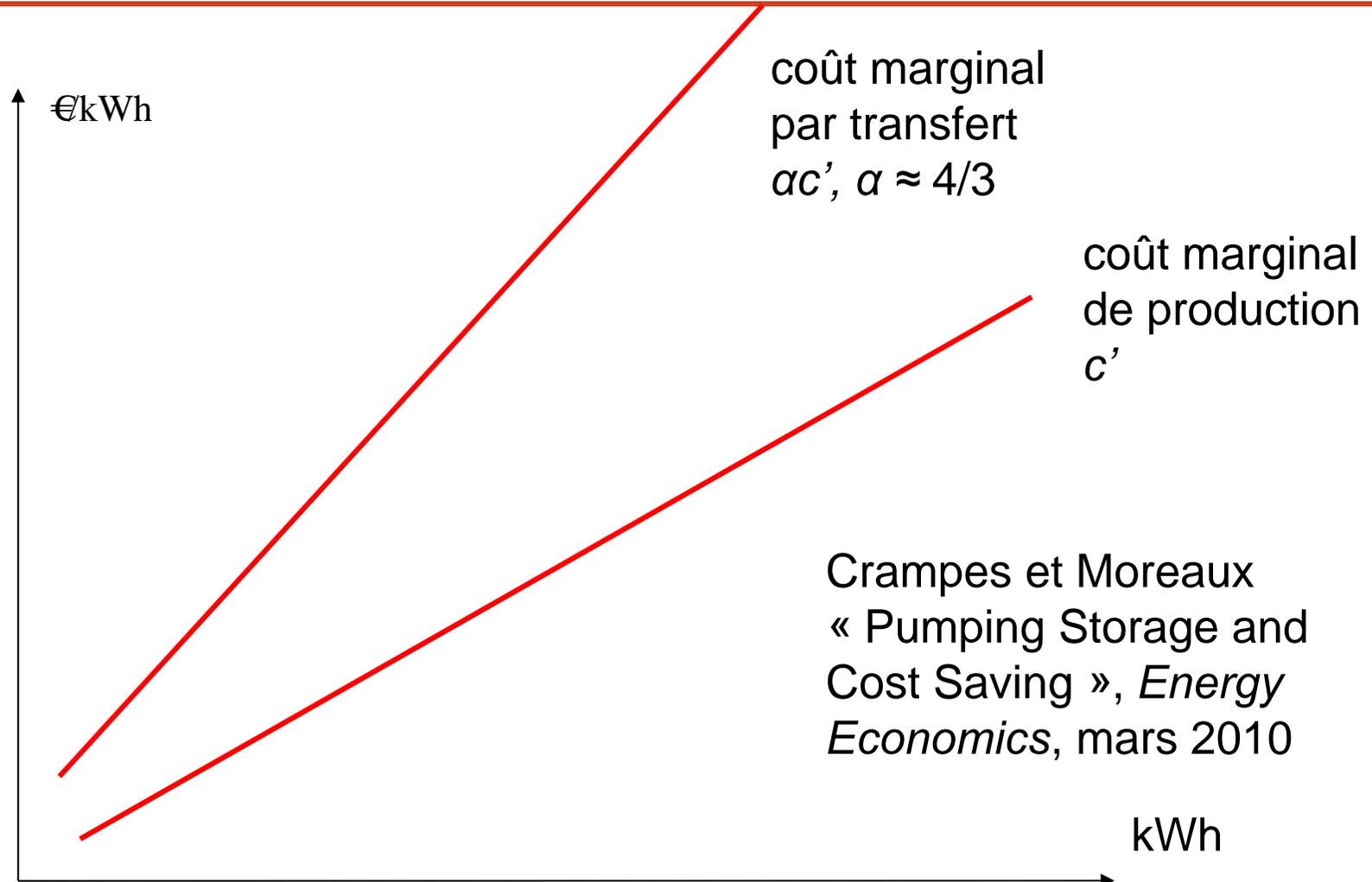
valeur d'une STEP

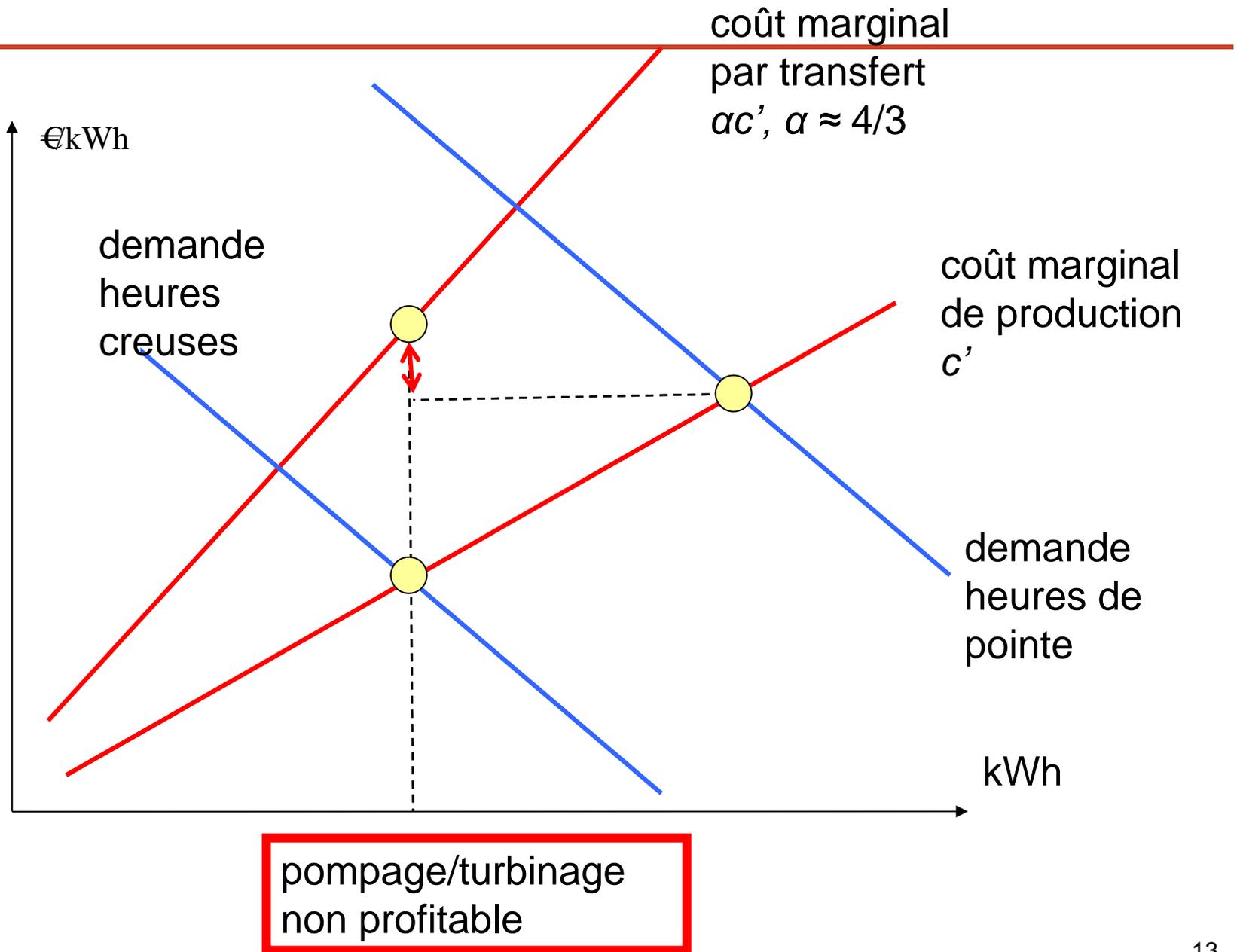
- La valeur économique d'un processus est donnée par l'écart maximum réalisable entre la valeur de ses outputs et la valeur des inputs utilisés dans le processus.
- Donc la valeur d'une STEP est la somme actualisée des écarts entre la valeur des MWh vendus et celle des MWh achetés (+ les frais de maintenance).
- Si les marchés sont concurrentiels, cette valeur privée est aussi la valeur sociale de la STEP.

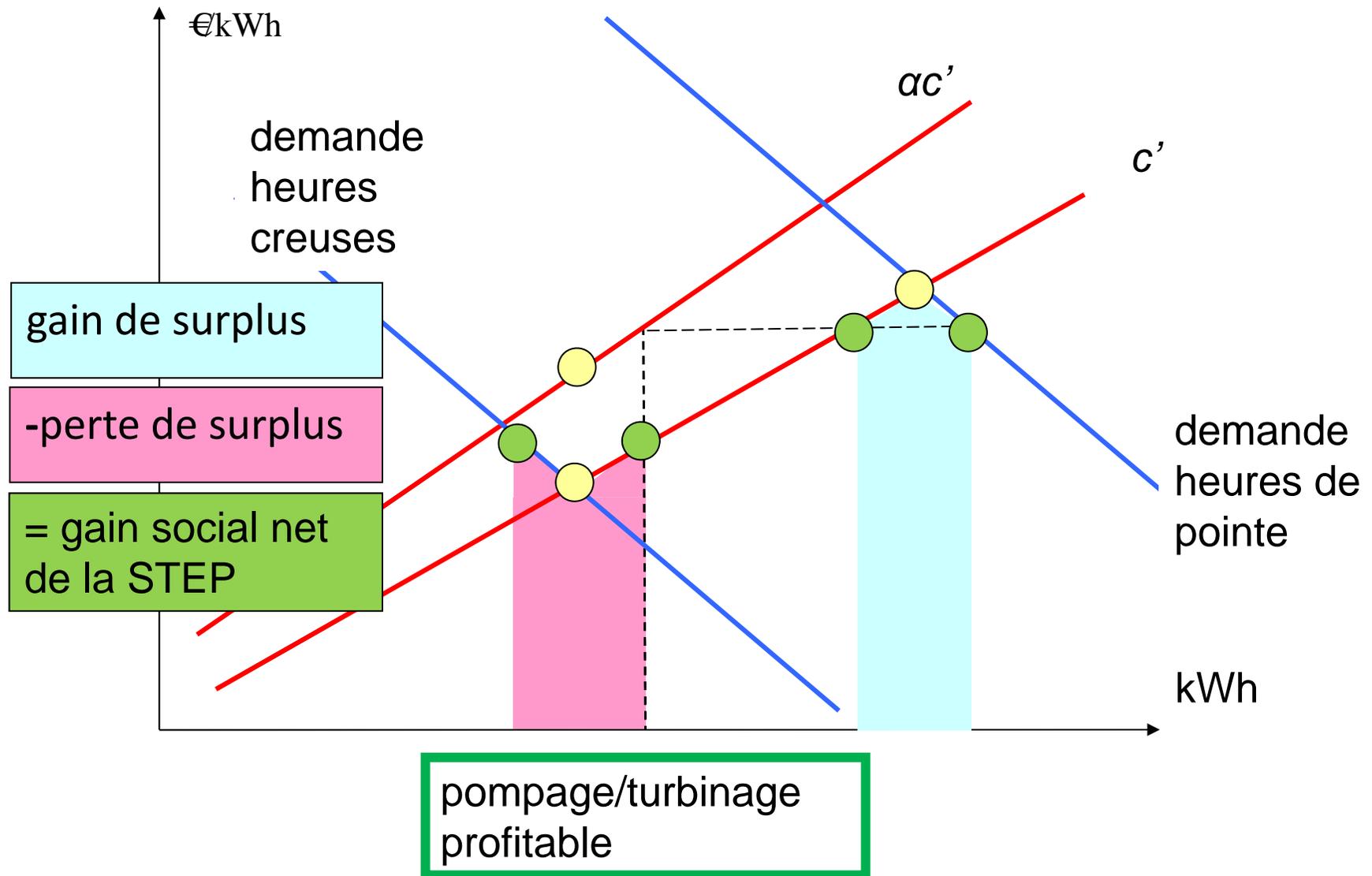
marché de gros



analyse économique







2. valeur économique de la station

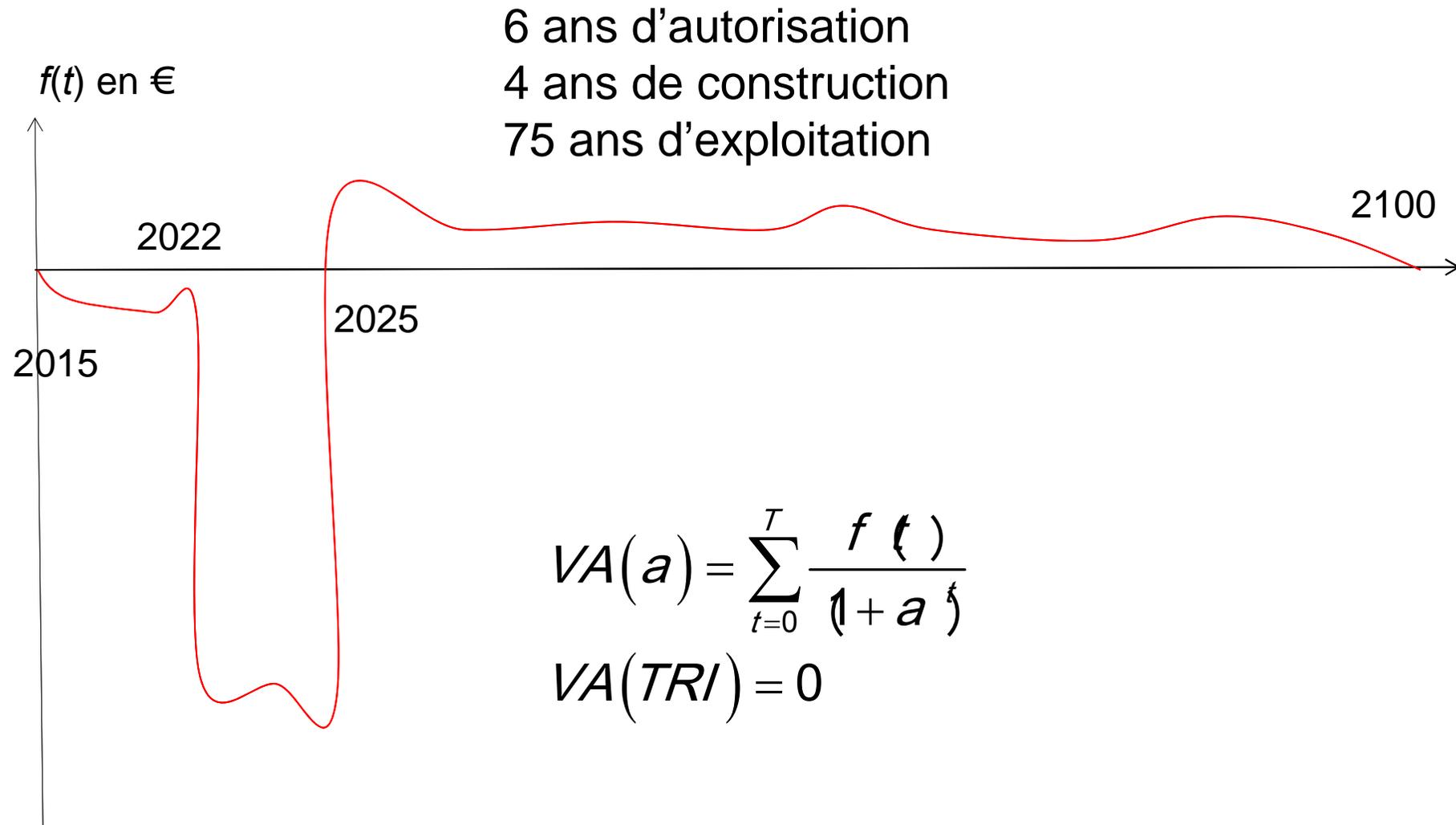
- La valeur économique d'une STEP est d'autant plus grande que
 - l'écart entre dispositions à payer en pointe et hors pointe est grand;
 - le coût de transfert α est petit; qu'attendre de la R&D?
 - le coût marginal (ordre de mérite) est convexe: bon débouché pour le nucléaire et les énergies fatales;
- Principales limites:
 - les capacités (de stockage amont et aval, de pompage et turbinage, de transport de l'électricité
 - la concurrence des énergies intermittentes
- Les solutions en termes de:
 - rémunération de la capacité
 - rémunération de la flexibilité
 - réforme des droits d'accès et de la fiscalité

profitabilité?

- Les STEP ont surtout été construites entre 1970 et 1990 pour accompagner le déploiement du parc nucléaire.
- Problèmes:
 - trouver des sites;
 - à cause de la baisse de la consommation, le développement des renouvelables et le bas prix du charbon, les prix en pointe ne sont suffisamment élevés pour rentabiliser l'investissement (entre .5 et 2m€)
- Cependant, avec le déploiement des énergies intermittentes et les prix de gros négatifs, l'avenir s'éclaircit:
 - par ex. Axpo prépare « Linthal 2015 »: construction d'une nouvelle centrale de pompage-turbinage souterraine pour refouler l'eau du Limmernsee vers le Muttsee, situé 630 m plus haut avant turbinage. La puissance de pompage et de turbinage de la nouvelle usine sera de 1000 MW. (www.axpo.com/axpo/ch/fr/axpo-erleben/linthal-2015.html)

- <http://ufe-electricite.fr/> 18/01/2013
- « *Le taux de rentabilité interne en l'état actuel des STEP même développées à partir d'un réservoir existant (optimisation du transfert d'énergie, services système à 17€.72/h.MW, composante soutirage du TURPE) est très faible (2,7%).*
- *Ce taux est très éloigné du niveau de TRI permettant de maintenir l'investissement des industriels dans des projets (et correspondant au risque supporté par ces projets), qui est de l'ordre de 8% après taxe.*
- *Comment augmenter le TRI? »*

cash flow attendu



caractéristiques techniques

- La STEP étudiée est une STEP « moyenne » correspondant à une puissance installée de 800 MW réversible et une capacité de stockage de 16,4 GWh.
- Un des deux bassins est supposé préexistant.
- Ratio turbinage - pompage avec un rendement de 80%,

Le modèle de STEP étudiée est de type hebdomadaire, selon le cycle de pompage-turbinage suivant :

Pompage	lundi	mardi	mercredi	jeudi	vendredi	samedi	dimanche	Total
heures par jour	5	5	5	5	6	12	12	50
heures par an	260	260	260	260	312	624	624	2 600

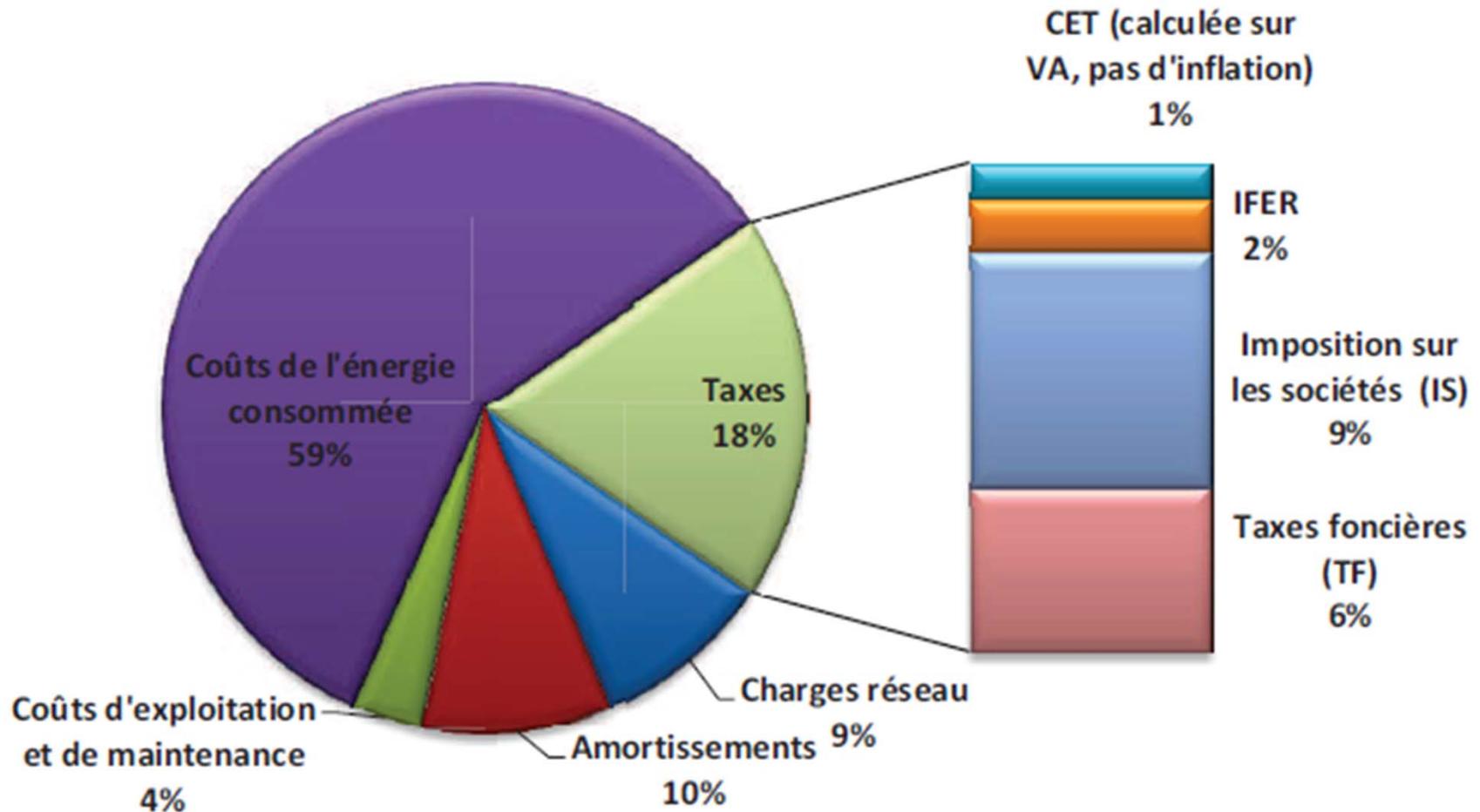
Turbinage	lundi	mardi	mercredi	jeudi	vendredi	samedi	dimanche	Total
heures par jour	8	8	8	8	7	0	0	39
heures par an	416	416	416	416	364	-	-	2 028

investissement

- L'investissement considéré est de 1 040 M€, en prenant en compte les hypothèses suivantes :
 - Un coût d'investissement de 1 300 k€ par MW installé,
 - La préexistence d'un des deux bassins
 - Un investissement uniformément réparti sur une période de 4 années.
- Amortissement linéaire sur 75 ans.
- La STEP étant sous le régime de concession, la valeur terminale du projet aux différents horizons de temps est considérée comme nulle.

caractéristiques des coûts

Répartition des charges à régulation constante



IFER: Imposition forfaitaire sur les entreprises de réseaux; **CET**: contribution économique territoriale

revenus

- STEP considérée comme « stand alone », *i.e.* elle fonctionne comme si elle était gérée par une société indépendante, en fonction des opportunités de marché et en dehors de toute optimisation d'un portefeuille d'actifs de production.
- Les revenus viennent des services rendus au système électrique :
 - transfert d'énergie par stockage
 - services système
 - marché de capacité

revenus (suite)

- Les revenus du **transfert d'énergie** sont tirés de l'optimisation par un outil de recherche opérationnelle utilisant la chronique des prix du marché spot 2011.
- Participation aux **services systèmes** (SSY) fixée à 7% de la puissance totale de la centrale (2.5% pour la Réserve Primaire de Fréquence et 4.5% pour la Réserve secondaire), soit 56 MW de capacité réservée en moyenne. La rémunération 2013 était 17.72 €/h.MW. Donc

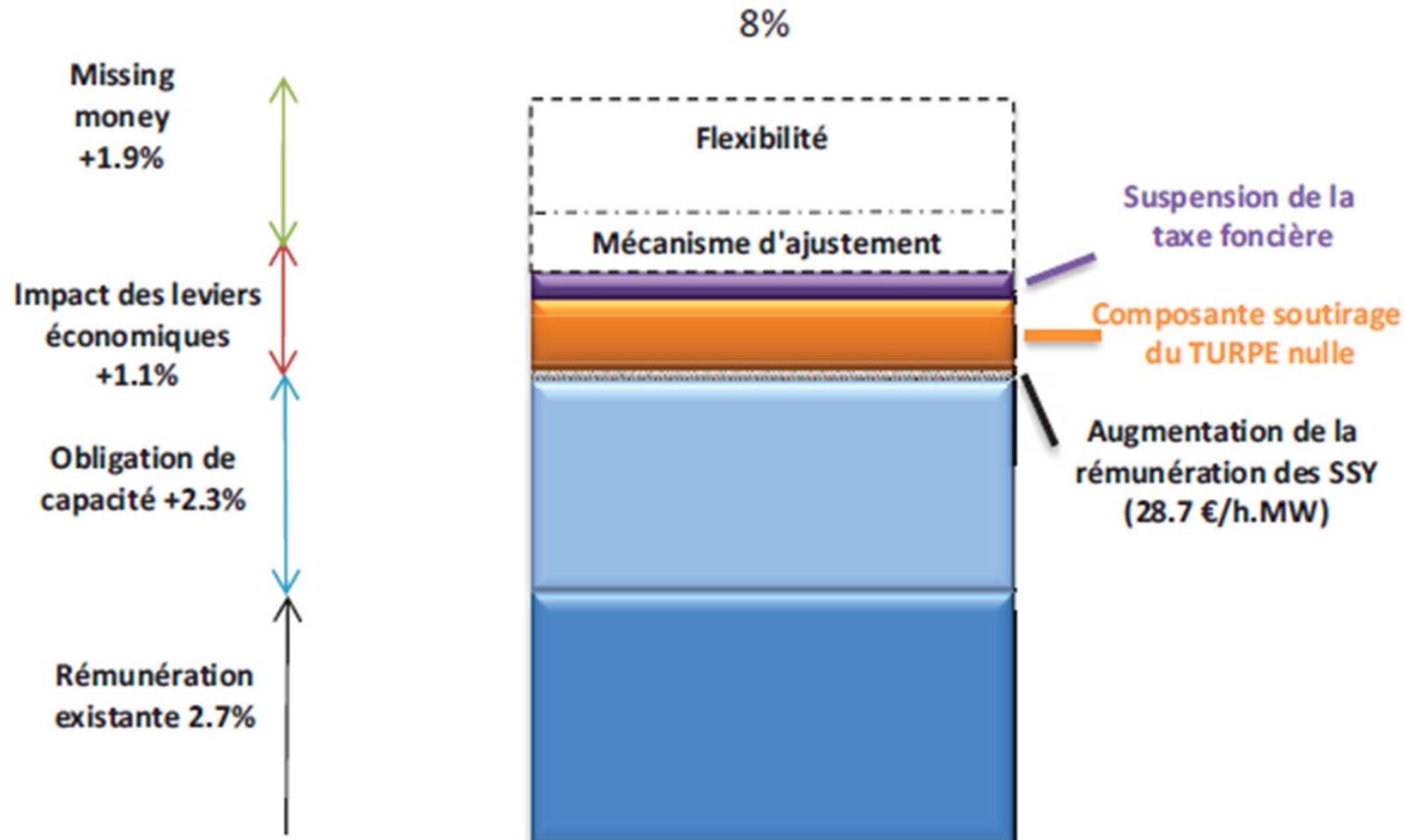
Revenus $17.72 \times 56 \text{ MW} \times \text{heures de fonctionnement}$

- La **rémunération de la capacité** (loi NOME) est calculée pour une puissance disponible certifiée de $(100-7)\% \times 800 \text{ MW} = 744 \text{ MW}$. Sur la période considérée, la valeur de référence retenue est 30 k€/MW/an, soit un revenu annuel de

$$30.000 \times 744 \text{ MW} = 22.32 \text{ M€}$$

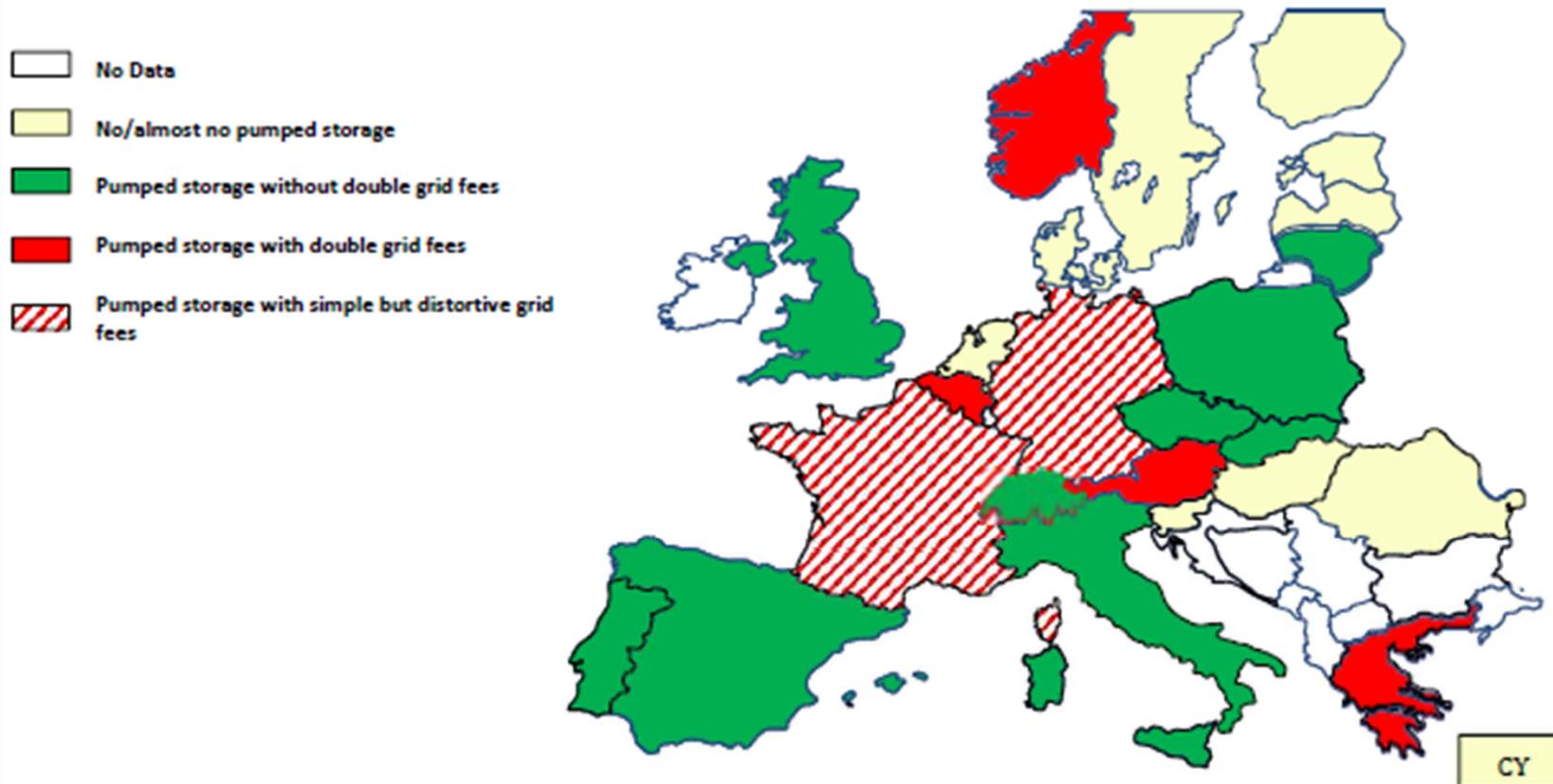
résultats de la simulation

- Même gérée au mieux, la STEP n'est pas rentable.



droits d'accès au réseau

Where is pumped storage subject to discriminatory grid fees?



Source: EURELECTRIC WG Hydro analysis mai 2012

principales revendications

- augmenter la rémunération des services systèmes
- réduire la fiscalité
- réduire les coûts d'utilisation du réseau
- rémunérer la flexibilité
 - exemple: en octobre 2011, les Etats-Unis ont mis en place une «rémunération au kilomètre» (MW mileage) de la courbe de charge pour rendre compte de la flexibilité des moyens raccordés au réseau. La rémunération de la production électrique inclut ainsi la rapidité de réaction de cette production et non pas seulement la somme de l'énergie modulée.

FERC Order 755:

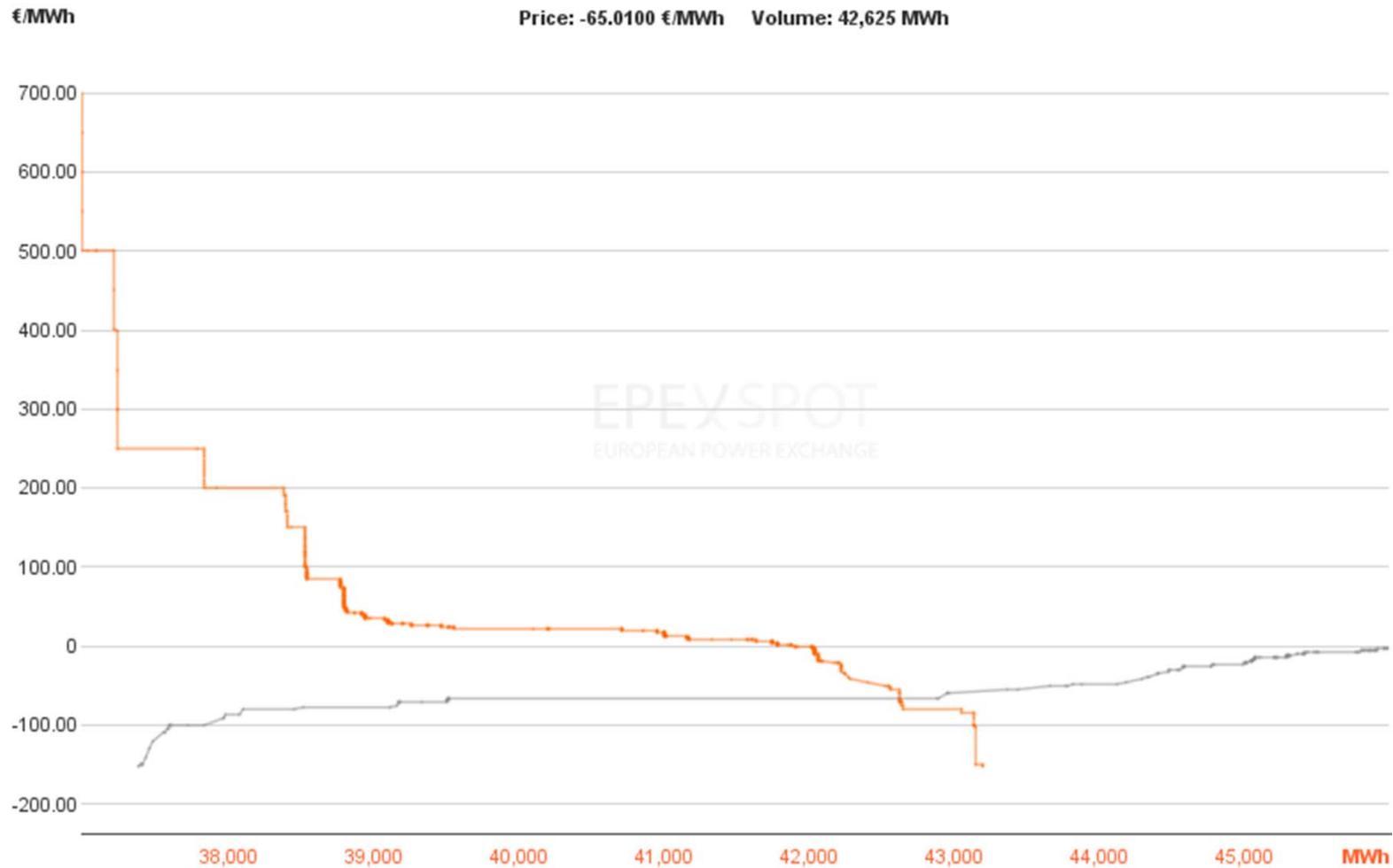
www.ferc.gov/whats-new/comm-meet/2011/102011/E-28.pdf.

les prix négatifs peuvent être une aubaine



www.epexspot.com/en/market-data/auction/chart/auction-chart/2014-05-11/DE

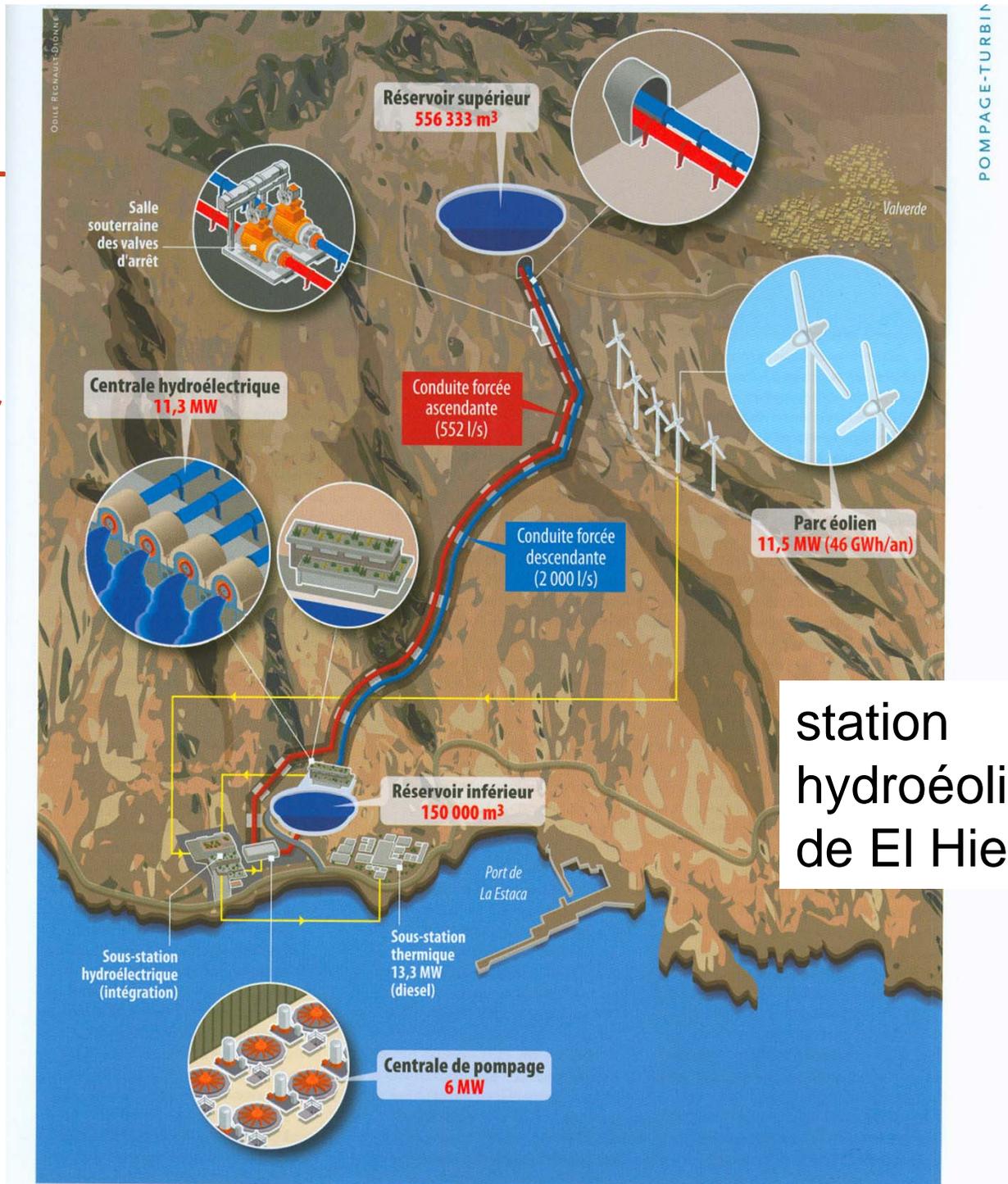
enchères négatives



www.epexspot.com/en/market-data/auction/curve/auction-aggregated-curve/2014-05-11/DE/15/4

rôle stabilisateur dans les systèmes non interconnectés

source: Systèmes solaires, n°201, 2011



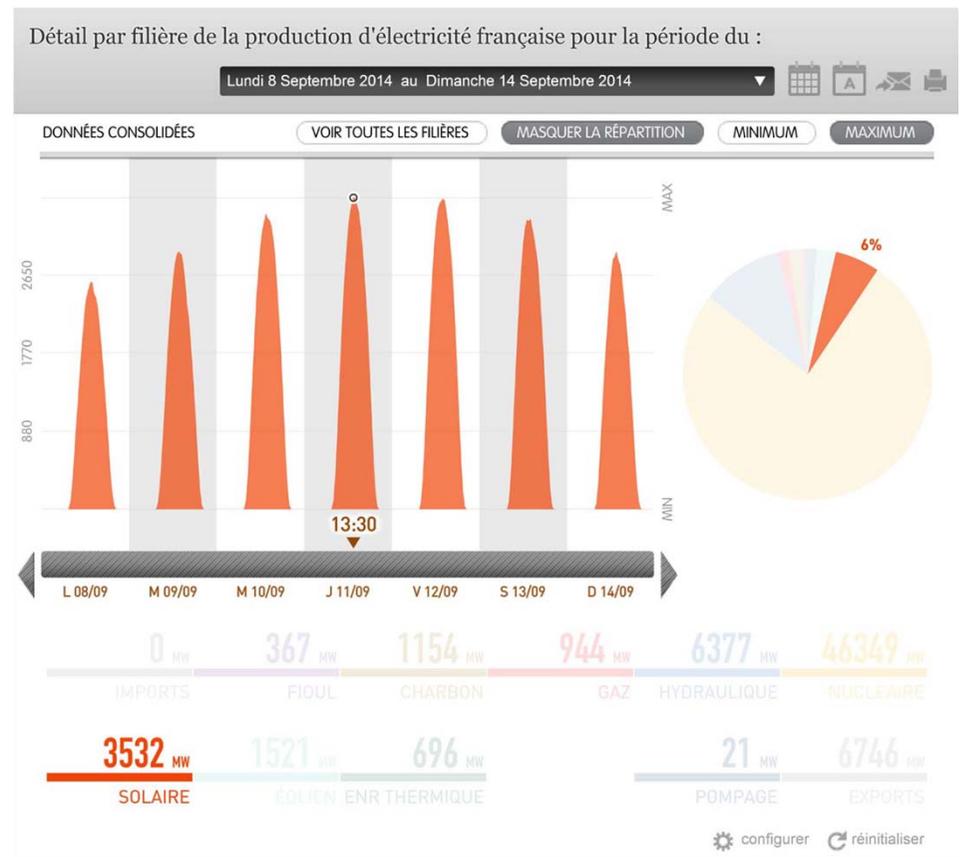
station hydroéolienne de El Hierro

El hierro

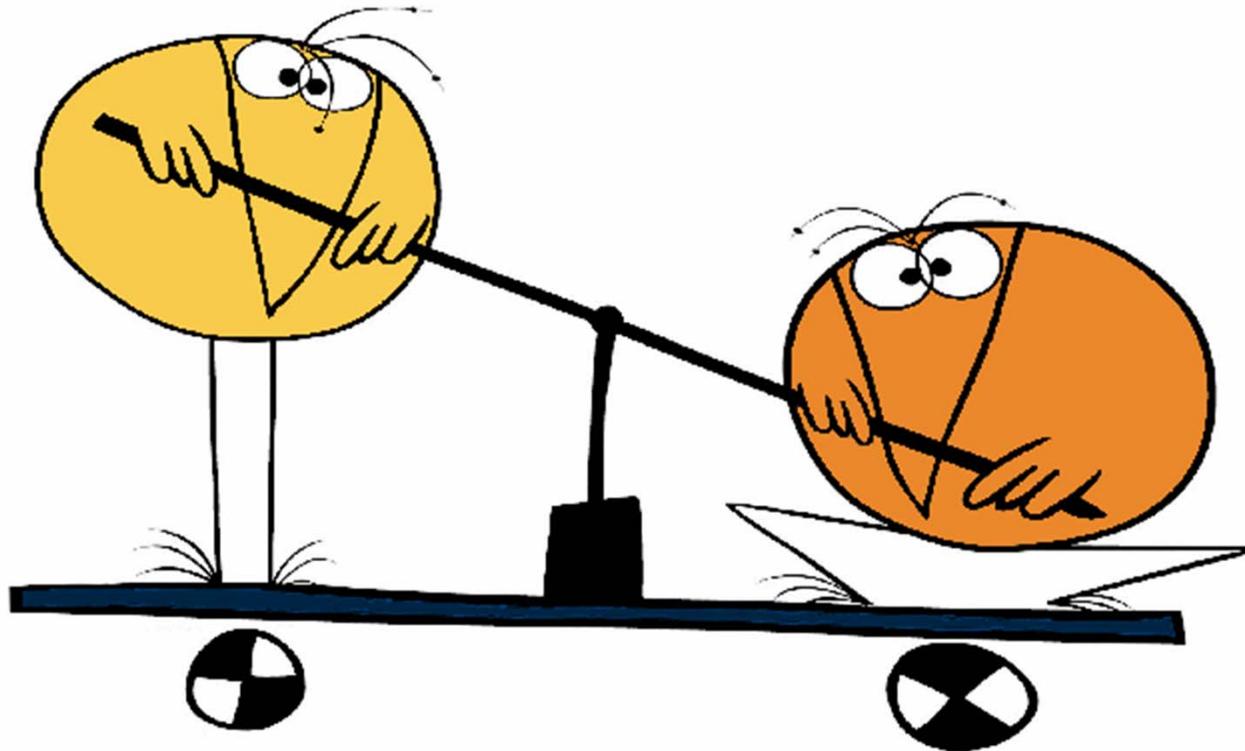
- Première île du monde, de cette taille (environ 10 000 h) et non interconnectée à devenir autonome en électricité grâce à une centrale hydro-éolienne originale mise en fonction fin juin 2014:
 - 5 éoliennes de 2,1 MW chacune,
 - une usine de dessalement de l'eau de mer,
 - une centrale hydraulique de 11 MW
 - deux réservoirs fonctionnant en STEP, à 50 et 700 m d'altitude respectivement;
 - l'ancienne centrale thermique au fioul lourd, située près de la centrale hydraulique est maintenue comme système de secours.

en conclusion

- aujourd'hui non rentable
- mais rôle important à venir à cause de l'intermittence des renouvelables
- financement complémentaire
 - prix négatifs
 - mécanisme de capacité
 - rémunération de la flexibilité



en conclusion



en conclusion

Les devises Shadok



IL VAUT MIEUX POMPER MÊME S'IL NE SE PASSE
RIEN QUE RISQUER QU'IL SE PASSE QUELQUE CHOSE
DE PIRE EN NE POMPANT PAS.