

Flexibilisation de la demande énergétique industrielle - intérêts, solutions et limites

DUAULT Victor, HUBERT Ulysse,
MARCHIER Arthur, VERDE MOTA Amanda

Le secteur industriel figure parmi les plus grands émetteurs de gaz à effet de serre et devra progressivement s'électrifier pour réduire son empreinte carbone. Cette évolution implique de repenser l'organisation du réseau électrique, afin d'éviter sa saturation face à une demande énergétique industrielle très élevée. Dans ce contexte, rendre la consommation des usines plus flexible est essentiel pour accompagner cette transition.

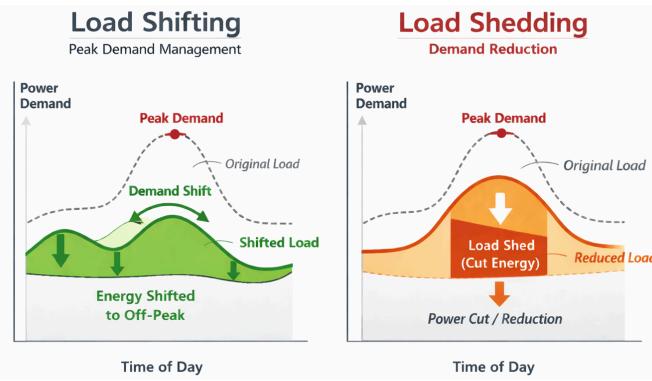
1

CONCEPT DE BASE



La production électrique évolue au cours du temps. Flexibiliser la demande énergétique industrielle, c'est adapter la consommation électrique des usines à la production électrique en:

- décalant la consommation dans le temps en augmentant la consommation lorsqu'il y a un surplus électrique dans le réseau ("load shifting")
- diminuant temporairement la consommation ("load shedding") lors des pics.



2

INTÉRÊT POUR L'INDUSTRIEL

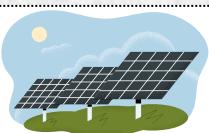


Deux moyens sont principalement mis en place pour inciter l'industriel à flexibiliser sa demande et présentent pour lui un intérêt économique :

- "incentive based demand response"**: l'industriel est rémunéré pour flexibiliser sa demande à la demande du distributeur d'énergie.
- "price based demand response"**: l'industriel paye plus cher lorsque la demande sur le réseau est importante.

3

INTÉRÊT POUR LE RÉSEAU ENERGETIQUE



- La flexibilisation de la demande énergétique fait que cette dernière est mieux répartie : il y a moins de pics de consommation d'énergie lors desquels la production d'énergie risque de ne pas pouvoir répondre à l'entièreté de la demande industrielle et moins de pertes d'énergie lorsque la production est trop élevée par rapport à la demande.
- La flexibilisation permet également de pallier à l'intermittence des sources d'énergie renouvelables comme le solaire ou l'éolien en consommant plus aux pics de production.
- Enfin il y a l'intérêt environnemental : la flexibilisation fait que l'industriel s'adapte à la production d'énergies bas carbone et consomme ces d'énergies plus "vertes".

4

LES SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES DÉVELOPPÉES PAR LES INDUSTRIELS



- Développer les capacités de stockage d'énergie par batterie pour effectuer du "load shifting" et fournir la production lorsque le consommateur la réclame et ainsi produire à bas prix d'énergie.
- Mettre en place des dispositifs de production de soutien pour pallier un manque d'énergie.
- S'intéresser aux infrastructures de stockage et de flexibilisation potentielle dès la construction des bâtiments industriels.

5

LIMITES ET DÉFIS



- Les périodes de "load shedding" et de "load shifting" entraînent une variabilité des coûts pour les industriels (coût des arrêts/redémarrages, baisse de la production, modernisation du matériel, ...)
- Les batteries de stockage électrique sont souvent limitées en temps (quelques heures uniquement) et ne permettent pas un stockage sur plusieurs jours.

6

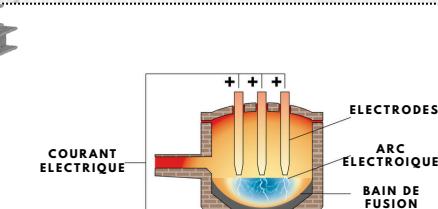
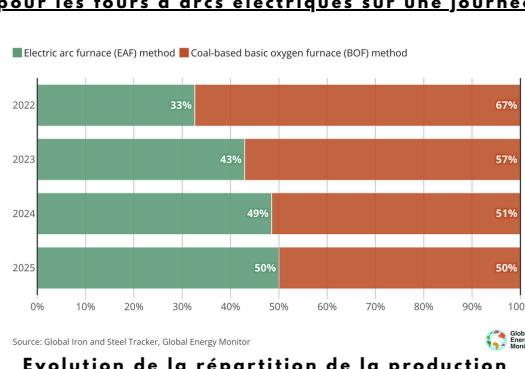
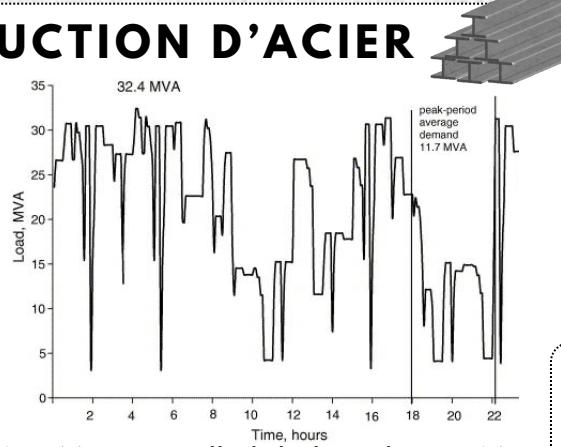
CAS D'ETUDE PARTICULIER: LA PRODUCTION D'ACIER

Aujourd'hui, le secteur de l'acier représente 20% des émissions du secteur industriel. La décarbonation de ce secteur peut être permise par l'émergence des fours à arcs électriques. Ces fours permettent de produire de l'acier en rejetant quarante fois moins de CO₂ que les haut fourneaux, en rejetant en moyenne 0.05t de CO₂ par tonnes d'acier recyclé. Ils présentent donc un intérêt environnemental non-négligeable.

De plus les fours à arc électrique permettent de flexibiliser la production d'acier via le load shifting. En effet, ils sont faciles à démarrer et à arrêter, contrairement aux haut fourneaux qui doivent fonctionner en continu. Ils peuvent ainsi aisément s'adapter à des planifications de fonctionnement souvent effectuées du jour pour le lendemain.

Enfin les fours à arc électrique permettent une production d'acier "secondaire", c'est-à-dire à partir d'un recyclage de ferraille. La production d'acier via un four à arc électrique peut se faire avec jusqu'à 100% de matériaux recyclés. En comparaison, un haut fourneau peut produire de l'acier à partir d'au maximum 20% d'acier recyclé, et de plus cela réduit le contrôle sur la teneur en carbone de l'acier obtenu.

Cependant de nombreux hauts fourneaux sont encore utilisés et le changement de méthode de production représente un coût non négligeable pour les industriels. L'installation d'un four à arc électrique peut en effet aller de quelques millions d'euros à plus de 80 millions d'euros.



EXEMPLE : LA PRODUCTION D'HYDROGÈNE



La production d'hydrogène par électrolyse peut être remplacée par une production par vaporeformage lorsque le réseau électrique est sous tension, bien que cette méthode rejette du CO₂ en quantité importante. Une autre manière de soulager le réseau électrique passe par le stockage de l'hydrogène produit en cavités salines ou dans des tanks par exemple, afin d'avoir de l'hydrogène prêt à être utilisé si la production diminue momentanément.

SOURCES

- D. Papadopoulos et al., "Quantifying the potential economic benefits of flexible industrial demand in the european power system," *IEEE Trans Industr Inform*, vol. 14, no. 11, pp. 5123-132, Nov. 2018, doi: 10.1109/TII.2018.2811734.
- M. Paulus and F. Borggreve, "The potential of demand-side management in energy-intensive industries for electricity markets in Germany," *Appl Energy*, vol. 88, no. 2, pp. 432-41, Feb. 2011, doi: 10.1016/J.APENERGY.2010.03.017.
- J. J. Gómez, "Electricity flexibility in the Chemical Process Industry," *Glob Energy*, 2021.
- RTE, "Chapitre 6 - Equilibre offre-demande flexibilité," in *Bilan Présentiel 2023*, RTE, Ed., 2024.
- A. Boldrin, D. Koelen, W. Crijn-Groen, E. Woerdman et van den Broek, "Flexibility options in a decarbonising iron and steel industry," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 189, p. 113988, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.RSER.2023.113988.
- F. Zorzan, "Metallurgical flexibility: Ensuring the aluminum industry is fit for demand response," Jan. 2024.
- ArcelorMittal, "Le haut-fourneau et le four à arc électrique : deux façons complémentaires de produire de l'acier," Avr. 2025.
- Global Energy Monitor, "Fours à arc électrique et décarbonisation de l'acier," Jan. 2026.

