

STOCKAGE ÉLECTRIQUE POUR L'INDUSTRIE

Intervenant : Jules ENEZIAN

Date : 7 octobre 2025



NALDEO, 4 filiales engagées au service des transitions

4 Filiales

Une couverture nationale et des projets internationaux

Conseil et stratégie
publique des territoires

Naldeo
*Stratégies
Publiques*

Ingénierie, études
techniques et maîtrise
d'oeuvre

Naldeo
*Ingénierie
& Conseil*

Diagnosics de réseaux,
suivi de chantiers

Performance et
fiabilité industrielle

Naldeo
*Technologies
& Industries*

Innovation et nouvelles
technologies

Solutions digitales et
data pour le climat

Naldeo
*Digital for
Climate*

13 SITES EN FRANCE



+250
SALARIÉS

€
25 Millions
de chiffre d'affaires

20 PROJETS/AN
A L'EXPORT

ISO 9001
ISO 14001
ISO 45001
ISO 50001
Certification MASE
Qualiméthas
OPQIBI



Intérêts du stockage

Le stockage présente de multiples intérêts pour accompagner une décarbonation du mix électrique, décongestionner les réseaux et participer à leur équilibrage.

Rapidité de développement des projets

- 18 mois permitting stockage
- Versus >10 ans ligne réseau électrique et plusieurs années travaux poste source

Réglage de la fréquence

- Déclenchement en moins de 500 ms permettant la participation au réglage de la fréquence

Réglage de la tension

- Possibilité d'injecter ou absorber de la puissance réactive
- Ceci sans affecter la puissance utile si bien dimensionné

Sécurité d'approvisionnement

- Possibilité de se rendre disponible pendant les pointes hivernales
- Sécurité d'approvisionnement décarboné

Gestion des congestions

- Fonctionnement contracyclique
- Ringo, Aoflex RTE et Enedis

Décarbonation

- Valorisation de l'énergie écrêtée
- Autoconsommation
- Effacement

Différentes sources de valeur sont exploitables pour valoriser les batteries

Le stockage ne sera pas construit en raison de sa supériorité technique ou de sa capacité à améliorer l'efficacité et l'impact environnemental de la production d'énergie.

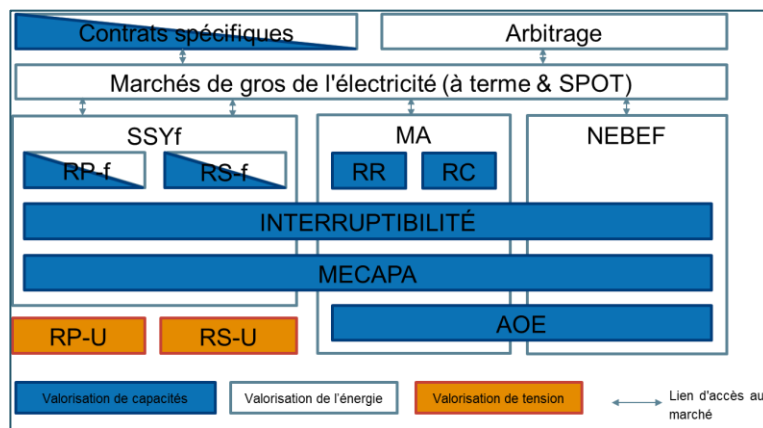
Il sera construit parce qu'il peut **générer des profits**, en offrant un taux de rendement compétitif par rapport à d'autres actifs.

Le stockage de l'électricité crée une valeur économique grâce à quatre services fondamentaux :

1. **Qualité de l'énergie** : Maintien de la fréquence et de la tension dans les limites autorisées
2. **Fiabilité de l'alimentation** : Fourniture d'électricité en cas de réduction ou d'interruption de l'approvisionnement
3. **Augmentation de l'utilisation** : Optimisation de l'utilisation des actifs existants dans le système électrique
4. **Arbitrage** : Exploiter les écarts de prix temporels

Ces dernières années, la qualité et la fiabilité de l'électricité ont été les plus lucratives (services auxiliaires et capacité).

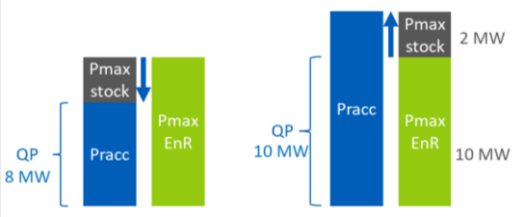
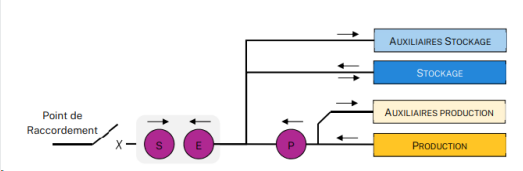
Cependant, **l'arbitrage des prix** (achat à bas prix et vente à prix élevé) est considéré comme ayant le rôle potentiel le plus important pour le stockage stationnaire.



Marchés et mécanismes accessibles aux batteries en France

Le couplage des batteries à des centrales photovoltaïques (comme à d'autres centrales EnR) présente des solutions de valorisation supplémentaires.

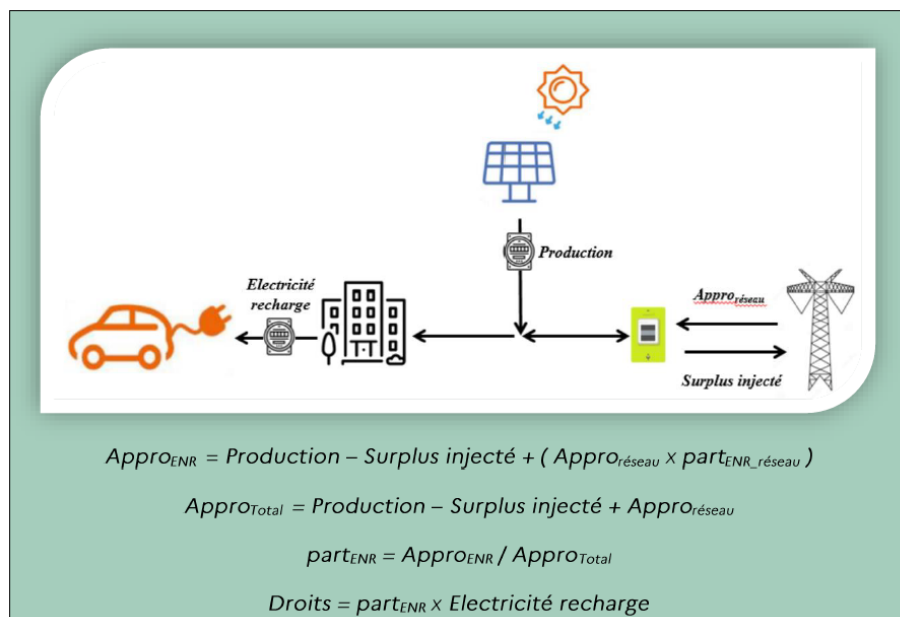
Hybridation PV et stockage – Mutualisation des couts de raccordement

Mode d'hybridation		Atout	Freins	Exemple existant
Contrats PV et Stockage distincts	① Raccordements séparés	Valorisation batterie non contrainte ↓ CAPEX foncier	Hybridation non valorisée	
	② Raccordement commun  	TURPE ↓ CAPEX raccordement ↓ Quote part et foncier	Contractualisation difficile avec les agrégateurs Limitation à l'injection lors des instants de production PV	

Valorisation de l'actif de stockage - Zoom sur la Tiruert utilisation de l'énergie verte pour la recharge des véhicules électriques

L'émission de droits TIRUERT est déterminée par trois éléments

- 1 La part en électricité renouvelable, formée par
 - Le contenu en électricité **renouvelable** installé localement en **connexion directe**
 - Le contenu en électricité renouvelable du **réseau** électrique national
- 2 La quantité **d'énergie électrique** consommée par les points de recharge
- 3 **L'équivalence thermique – électrique** prévue à l'article L641-6 du code de l'énergie
 - facteur 5 pour le transport routier [1]



MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉNERGÉTIQUE

Direction générale de
l'énergie et du climat

Taxe incitative relative à l'utilisation d'énergie renouvelable dans les transports

Décret n° 2019-570 du 7 juin 2019

Comptabilisation des quantités d'électricité renouvelable utilisées pour la recharge des véhicules électriques sur les infrastructures ouvertes au public

Notion de connexion directe

La loi précise que seule l'électricité issue d'installations de production directement raccordées aux infrastructures de recharge peut contribuer à augmenter la part d'énergie renouvelable déclarée par l'aménageur. Ce critère implique que les installations de production et les infrastructures de recharge doivent être connectées en aval du même point de livraison; autrement dit, l'électricité injectée sur le réseau ne peut être valorisée (outre sa contribution au mix renouvelable national) et seule l'électricité renouvelable auto consommée par l'aménageur peut être valorisée comme telle.

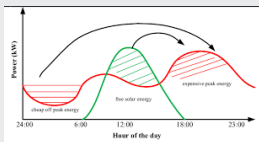
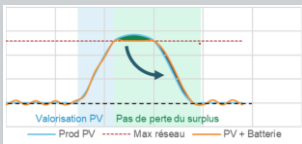
[1] <https://www.ecologie.gouv.fr/politique-s-publiques/biocarburants>

[2] Guide 2024 sur fiscalité des énergies-v2

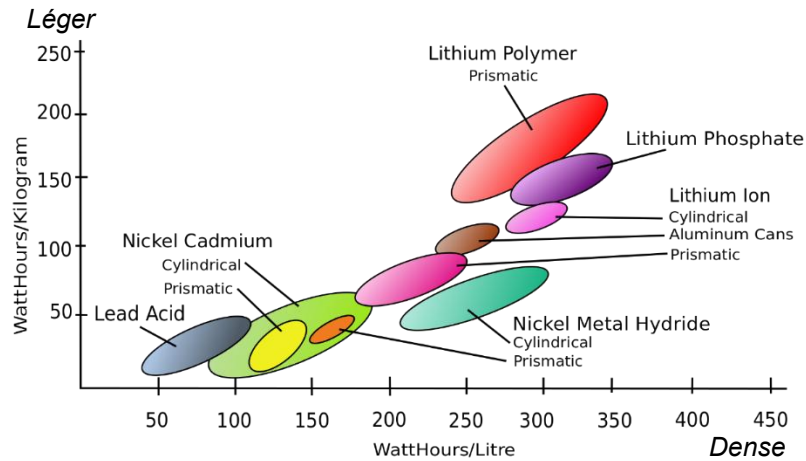
Ces droits sont ensuite **valorisés** en **exonération directe** ou **revendus**.

La Tiruert permet la valorisation d'un actif de stockage couplé à une unité EnR en optimisant l'autoconsommation pour la mobilité électrique de l'installation.

Hybridation PV + stockage – différentes configurations

Mode d'hybridation	Atout	Frein	Exemple existant
Valorisation couplée ③ Contrat Spécifique (Prime à la pointe + lissage de production) 	AO conçu pour l'hybridation : rentable	Contrats spécifiques	AOCRE ZNI, îles, réseaux isolés
④ Décalage de production 	Meilleure valorisation de la production PV	- Nécessite un contrat sans obligation d'achat de production - Même valorisation que ② si le PV est valorisé en full merchant	Pas d'exemple existant
⑤ Valorisation de l'écêtement 	- Augmente l'énergie PV valorisée par MW raccordé - Revenu additionnel stable	- Nécessite un fort écrêtement pour apporter un revenu significatif - Contraint le stockage avec l'incertitude sur la prévision de l'écêtement - Difficulté de contractualisation	Cas d'usage modélisé par Nadelo pour GLHD
⑥ Contrat PPA profilé 	- Produit à forte valeur - Dépend de la contractualisation	Nécessite de contractualiser à un prix d'achat élevé	Communication faite par Ze Energy

Différentes technologies de batteries existent et permettent de répondre à différents besoins



Densités énergétiques des différentes technologies de batteries

La densité d'énergie est un critère important pour le secteur de la mobilité et du stockage énergétique (gain spatial).

Cependant de nombreux autres critères entrent en compte, comme :

- Densité de puissance
- Réactivité
- Durabilité
- Coût
- Sécurité
- Rendement énergétique
- Etc.

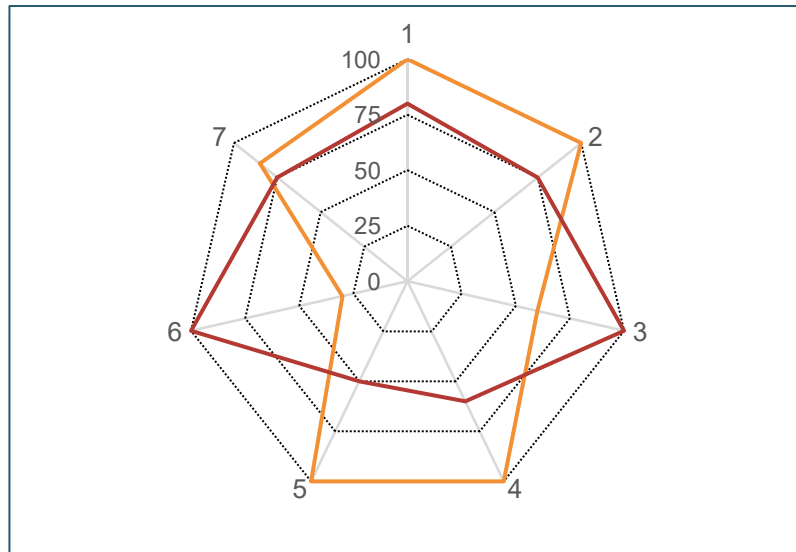


Schéma d'analyse multicritères

Aucune batterie n'est parfaite.
Il faut trouver le meilleur compromis en fonction de l'usage

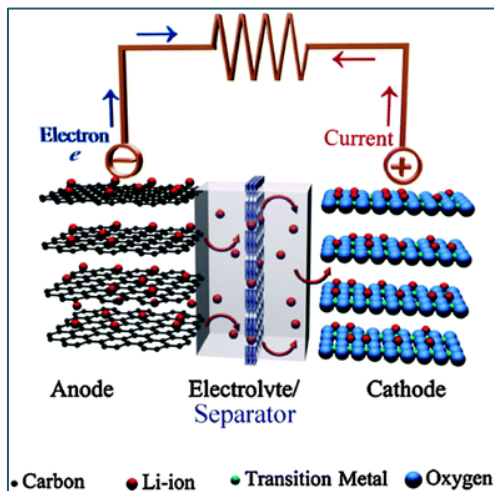
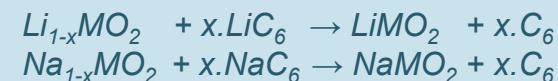
Les batteries lithium-ion ou Sodium-ion



Fiche spécifique sur les batteries Li-ion ou Na-ion

- Un atome de Li ou de Na stocké dans la structure graphitique libère un électron et se transforme en ion.
 - + Un ion Li+ ou Na+ est capté par le matériau actif en même temps qu'un électron provenant du circuit électrique.
- L'électron qui parcourt le circuit électrique permet d'alimenter une charge. Le processus est inversé lors de la recharge.

Bilan décharge ~4V



↓
ou Na-ion

Schéma de la batterie Li-ion/Na-ion

Maturité

Li-ion → TRL 9
Na-ion → TRL 6

CARACTERISTIQUES TECHNIQUES

Rendement : **80 à 85 %**
Durée de vie : **10-15 ans / 6 000 cycles DoD 80%**
Autodécharge relativement faible
Réactivité (passage de 0 à 100% de P_{max}) : millisecondes – secondes
Energie spécifique : **~150 Wh.kg⁻¹**

CARACTERISTIQUES ECONOMIQUES

Coûts en rapide décroissance.
CAPEX : **~150 €/kW / ~150 €/kWh_{CAP}**
OPEX : faibles coûts/quasi nuls

Domaines d'applications

Mobilité, appareils portables, stockage énergétique pour soutien au réseau, autoconsommation

Avantages

- Bonne cyclabilité mais dépendante des conditions d'utilisation
- Densité de puissance élevée
- Densité d'énergie élevée
- Rendement énergétique élevé
- Production de batteries Li-ion qui se développe en Europe (Verkor, ACC, Northvolt...)

Inconvénients

- Sécurité : risque d'emballement thermique et de combustion de l'électrolyte
- Vieillesse sensible à la température et accéléré avec des températures élevées
- Disponibilité des ressources limitée → coûts qui dépendent du marché des métaux

Les batteries Plomb-acide

Fiche spécifique sur les batteries Plomb-acide



L'électrode négative est constituée de plomb métallique (Pb) et l'électrode positive est constituée de dioxyde de plomb (PbO₂). L'ensemble baigne dans une solution aqueuse d'acide sulfurique (H₂SO₄) dilué dans de l'eau (H₂O).

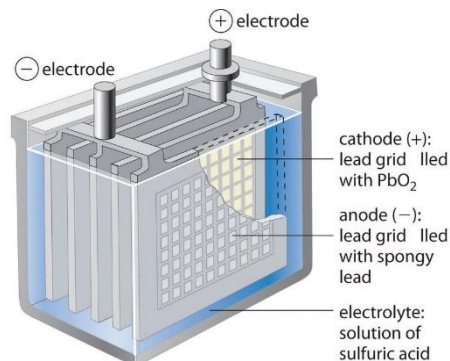
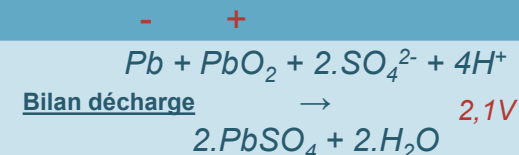
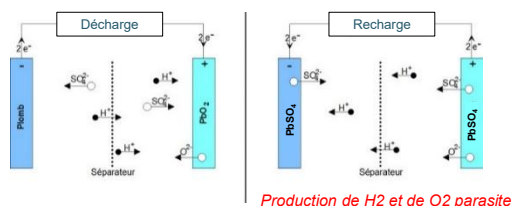


Schéma de la batterie Plomb acide

Maturité

TRL 9



CARACTERISTIQUES TECHNIQUES

Rendement : **70 à 85 %**
Durée de vie : **500 cycles DoD 80%**
Autodécharge faible (de 2 à 5% par mois)
Réactivité (passage de 0 à 100% de P_{max}) : millisecondes – secondes
Energie spécifique : **~35 Wh.kg⁻¹**

CARACTERISTIQUES ECONOMIQUES

CAPEX : **~150 €/kW / ~150 €/kWh_{CAP}** (batteries pour véhicules thermiques)
OPEX : coûts faibles mais non nuls

Domaines d'applications

Batteries pour véhicules thermiques, stockage énergétique pour soutien au réseau (régulation de fréquence)

Avantages

- Technologie mature depuis plusieurs décennies
- Technologie sûre
- Faible coût
- Disponibilité des ressources élevée
- Matériaux facilement recyclables et en grande partie recyclés

Inconvénients

- Faible densité énergétique
- Faible densité de puissance
- Faible durabilité (peu de cycles ou profondeur de décharge très réduite)
- Réactions parasites lors de la charge (électrolyse de l'eau)
- Besoin de maintenance (production de gaz lors de la recharge et consommation d'eau)

Les batteries Nickel-métal hydrure



Fiche spécifique sur les batteries Nickel-métal hydrure

L'électrode positive est constituée d'un Hydroxyde de nickel - $\text{Ni}(\text{OH})_2$ – et l'électrode positive est faite d'un hydrure métallique (alliage) capable d'absorber et désabsorber de l'hydrogène. L'électrolyte est généralement de l'hydroxyde de potassium afin de se placer dans des conditions basiques.

Bilan décharge

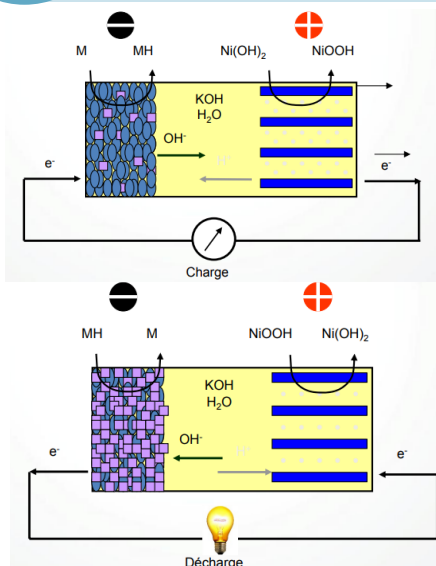
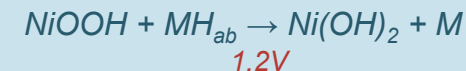


Schéma de la batterie Nickel-métal hydrure

Maturité

TRL 9

CARACTERISTIQUES TECHNIQUES

Rendement : **60 à 80 %**
 Durée de vie : **>1 000 cycles DoD 80%**
 Autodécharge élevée (de 10% les premières 24h puis 10%/mois)
 Réactivité (passage de 0 à 100% de P_{max}) : **< 1 seconde**
 Energie spécifique : **~75 Wh.kg⁻¹**

CARACTERISTIQUES ECONOMIQUES

CAPEX : **~150 €/kW / ~100 €/kWh_{CAP}** (coûts non représentatifs du stockage stationnaire)
 OPEX : coûts faibles mais non nuls

M est un alliage LaNi_5 , AB_5 -type, ou AB_2 -type
 Exemple de AB_2 -type: $\text{Ti}_{12}\text{Zr}_{21.5}\text{Ni}_{35.2}\text{V}_{3.5}\text{Cr}_{4.5}\text{Mn}_{13.6}\text{Sn}_{0.3}\text{Co}_{2}\text{Al}_{0.4}$
 Exemple de AB_5 -type: $\text{La}_{10.5}\text{Ce}_{4.3}\text{Pr}_{0.5}\text{Nd}_{1.4}\text{Ni}_{60.0}\text{Co}_{12.7}\text{Mn}_{5.9}\text{Al}_{4.7}$

Domaines d'applications

Batteries portables (AA, AAA, autre)

Avantages

- Technologie mature
- Procédés de fabrication maîtrisés
- « Pratique » pour les petits appareils
- Bonne puissance spécifique (jusqu'à 25C)
- Matériaux facilement recyclables et en grande partie recyclés

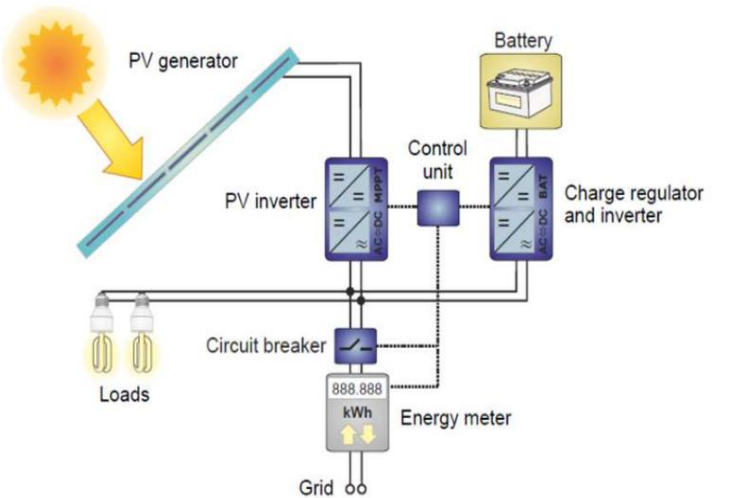
Inconvénients

- Très sensible à la température
- Durabilité moyenne (peu de cycles ou profondeur de décharge très réduite)
- Besoin de matériaux stratégiques pour la production de l'électrode (-)
- Réaction de décharge fortement exothermique
- Autodécharge élevée
- Rendement moyen

Intérêt écologique du stockage pour la production EnR

L'installation de batteries sur des installations EnR intermittentes

- Concerne principalement des installations PV
- A un impact CO2 augmenté par rapport au PV seul (de 54 à plus de 80g_CO2/kWh.)



Sources d'électricités courantes

Type de production	Contenu CO2 ACV (g/kWh)
Nucléaire	6
Hydraulique	6
Éolien	13
Solaire	55
Thermique renouvelable (biomasse solide) ¹	36
Charbon	1058
Fioul	730
Gaz	418
Divers ²	418
Solde importateur ³	386

Contenu CO2 en ACV et quantité associé (Source : ADEME)

Réseau français



Contenu CO2 mix France
(08/10/2024 à 16h15)

Couplage PV - batterie

	GHG (kg CO ₂ -eq/kWh)
PV electricity	0.054
Electricity self-consumption, option 1 (5kWh)	0.080
Electricity self-consumption, option 2 (10kWh)	0.084
Electricity self-consumption, option 3 (20kWh)	0.088

Contenu CO2 du couplage PV – stockage batterie

Le couplage batterie des EnR est intéressant pour décarboner la production électrique



www.naldeo-technologies-industries.com

Contact

Jules ENEZIAN

Email : jules.enezian@naldeo.com