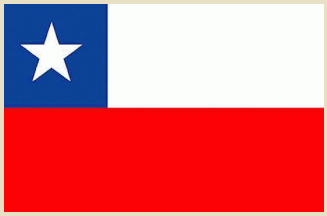


Voyage d'étude au CHILI

9 - 14 Mars 2009

Sommaire

Contexte énergétique	2
L'électricité au Chili	5
Cycle combiné Gaz	6
Station d'épuration	7
Station d'injection de gaz de ville	8
Chantier d'une centrale charbon	9
Mine de Cuivre	10
Potentiel géothermique ?	11
Salar et Lithium	12
Commission Nationale de l'Energie	13
Barrage Rapel	14
Partenaires	15
Contacts	16

ParisTech
GRANDES ECOLES D'INGENIEURS DE PARIS
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY

Promotion 2008

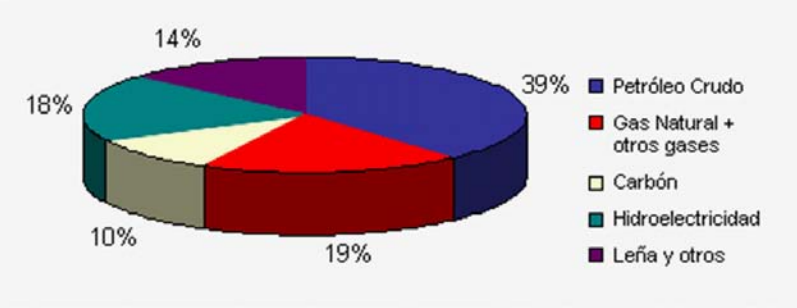
Le Chili est un pays du bout du monde.
A son extrême sud, l'île de Terre de Feu, le Cap Horn, ses mers déchainées, ses glaciers escarpés. Au nord, le désert de l'Atacama, l'un des plus secs au monde, entouré par les volcans de la Cordillère des Andes culminant à plus de 6000m d'altitude. Tendu entre ces deux extrêmes, poussé dans l'Océan Atlantique par les hautes montagnes de la Cordillère, cet étroit pays pourrait de prime abord paraître inhospitalier. Il n'en est rien. Au centre du pays, des fleuves collectant les eaux des montagnes irriguent des vallées fertiles, qui accueillent toutes sortes de cultures : le maïs bien sûr, très présent dans l'alimentation chilienne, les pommes de terre, différentes céréales, et des fruits, pommes, pêches, prunes, avocats, mais également de la vigne, la viticulture chilienne prenant son essor à l'international depuis une dizaine d'années.
Si la géographie du Chili peut impressionner, ses habitants rassureront. D'une très grande amabilité, avenantes et souriantes, les personnes rencontrées lors de ces quelques jours au Chili nous ont marqués. Dans un mélange d'espagnol, de français et d'anglais, nos échanges ont été extrêmement enrichissants pour tous, tant au plan professionnel qu'au plan humain.
Le Chili est un pays du bout du monde, et les chiliens nous ont conquis.

LE CHILI

Le système énergétique Chilien

Le Chili est un importateur net d'énergie. Il ne possède pas de grandes réserves énergétiques. Par exemple, le pétrole consommé ne représente que 1,7% de la production du pays. De la même façon, la quasi-totalité du gaz naturel était jusque là peu importée d'Argentine. Quatre pipelines ont été construits entre les deux pays. Les interconnections vont être renforcées par la construction d'une ligne trans-andine. En 2004, le gouvernement argentin a imposé d'importantes restrictions sur ses exportations de gaz, privilégiant son marché national et provoquant une pénurie d'énergie au Chili. Depuis, conscient de sa forte dépendance vis-à-vis du gaz argentin, le Chili accentue ses efforts d'indépendance et de diversification énergétique. Il a par exemple freiné le passage du gaz de ville au gaz naturel, remplacé de nombreuses installations par du diesel, et développé un terminal de regazéification près de Valparaiso et un deuxième prévu près d'Antofagasta.

La consommation d'électricité a dépassé les 51 573 GWh en 2005 dont 54 % ont été produits par des centrales hydrauliques. Mais ce potentiel hydroélectrique reste encore assez faiblement exploité. Le pays utilise 20 % des capacités potentielles par la volonté de protection de la faune et la flore de la région d'Aysén. Il n'existe pas pour le moment de centrale nucléaire, cependant, en



2006 s'est ouvert le débat sur la faisabilité technique de l'utilisation de ce type d'énergie. La mise en place d'éoliennes et l'utilisation de l'énergie géothermique sont aussi envisagées par le pays, mais la part d'énergies renouvelables hors hydraulique reste très faible.

Au Chili les énergies sont classées comme conventionnelles et non conventionnelles. Les premières sont les combustibles fossiles et la grande hydraulique (>20 MW) tandis que les énergies non conventionnelles sont la biomasse, l'éolien, le solaire, l'énergie marémotrice et la petite hydraulique. Le Chili s'est engagé à ce que d'ici 2010, 15% de la nouvelle capacité installée provienne de sources d'énergies renouvelables non conventionnelles.

Seulement 2 MW d'énergie éolienne sont installés dans le système Aysén, mais avec un fort potentiel dans le sud du pays. L'inconvénient reste la connexion au réseau électrique.

La petite hydraulique, en raison de son faible niveau de mise en œuvre, représente une alternative pour la fourniture d'électricité dans les zones rurales. Elle compte environ 110 installations actuellement dans le pays.

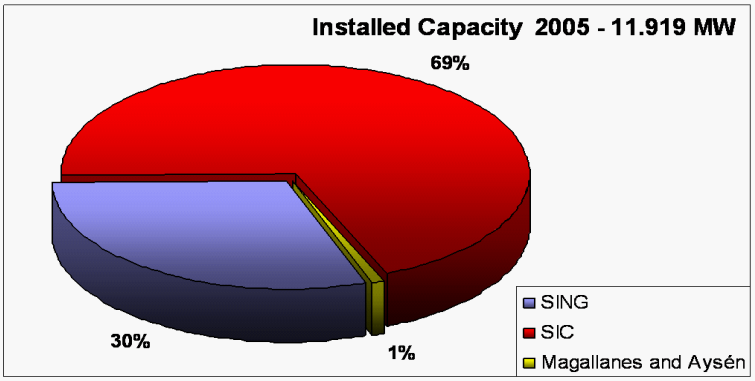
Type de centrale	SING	SIC	Système AYSEN	Système MAGALLANES	TOTAL
HYDRAULIQUE	**12,8**	**4.874,3**	**19,9**	**0,0**	**4.907,0**
Barrage	0,0	3.393,4	0,0	0,0	3.393,4
Fil De L'eau	12,8	1.480,9	19,9	0,0	1.513,6
THERMIQUE	**3.589,1**	**4.225,8**	**25,9**	**79,6**	**7.920,4**
Charbon	1.205,6	837,7	0,0	0,0	2.043,3
Gaz Naturel	2.111,7	2.539,3	0,0	68,1	4.719,0
Pétrole	271,8	657,9	25,9	11,5	967,1
Biomasse	0,0	190,9	0,0	0,0	190,9
EOLIEN	**0,0**	**18,1**	**2,0**	**0,0**	**20,1**
TOTAL	**3.601,9**	**9.118,2**	**33,5**	**79,6**	**12.847,5**

Puissance installée en MW par zones et par type de centrale (source CNE 2007).

LE CHILI

Au Chili, l'énergie solaire est utilisée dans le nord du pays, profitant de son rayonnement très élevé. Le développement de la technologie photovoltaïque au Chili comprend des applications pour les télécommunications, radiodiffusion dans les régions isolées, des systèmes d'éclairage, et des panneaux photovoltaïques pour l'électrification rurale. Mais, malgré le fort potentiel dans le nord, la filière reste toujours négligeable.

Quand à la biomasse, elle est actuellement utilisée au Chili pour produire de l'électricité et l'injecter dans le réseau par le biais des centrales de cogénération qui utilisent les résidus (liqueur noire, écorce) du processus de production de cellulose.



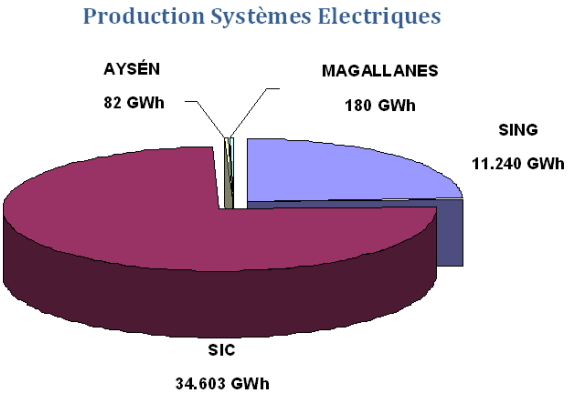
Le système électrique

Au Chili, il existe quatre systèmes électriques interconnectés. Le Système Interconnecté du Grand Nord (SING), qui couvre le territoire entre les villes d'Arica et Antofagasta avec 30,17% de la capacité installée dans le pays, le Système Interconnecté Central (SIC), qui s'étend entre les villes Taltal et Chiloé avec 69,01% de la capacité installée; le système d'Aysén dans la Région XI avec une capacité de 0,28%, et le système de Magellan, qui alimente la région XII avec 0,54% de la capacité installée dans le pays.

Dans le système SING le parc de production est principalement thermoélectrique, constitué par 99,63% de centrales thermiques à charbon, au diesel et des cycles combinés au gaz naturel. Il existe uniquement deux unités hydrauliques, représentant seulement 0,37% de la capacité installée.

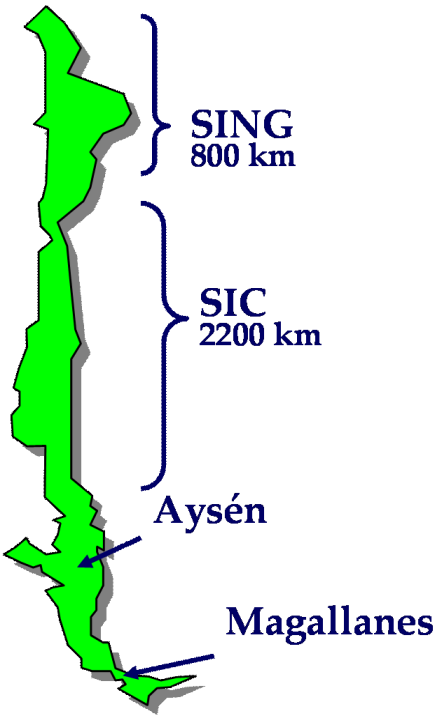
Dans le système Aysén la capacité installée est de 23,41 MW, constituée par 63,86% de centrales thermiques, 27,68% d'hydraulique et 8,46% d'énergie éolienne.

Le système de Magellan se compose de trois sous-systèmes électriques: les systèmes de Punta Arenas, Puerto Natales et Puerto Porvenir, dans la région XII. La capacité installée de ces systèmes est de 58,5 MW, 4,2 MW et 1,8 MW respectivement, tous 100% thermique.



Le SIC, est constitué par 60,13% de production hydraulique de barrages et 39,87% par des centrales thermiques à charbon, diesel et cycles combinés au gaz naturel.

Mis à part l'ENAP (pétrole national du sud du Chili), tout le secteur énergétique chilien est privé. Les acteurs des systèmes de Transmission ou Distribution sont par exemple bien plus nombreux qu'en France et



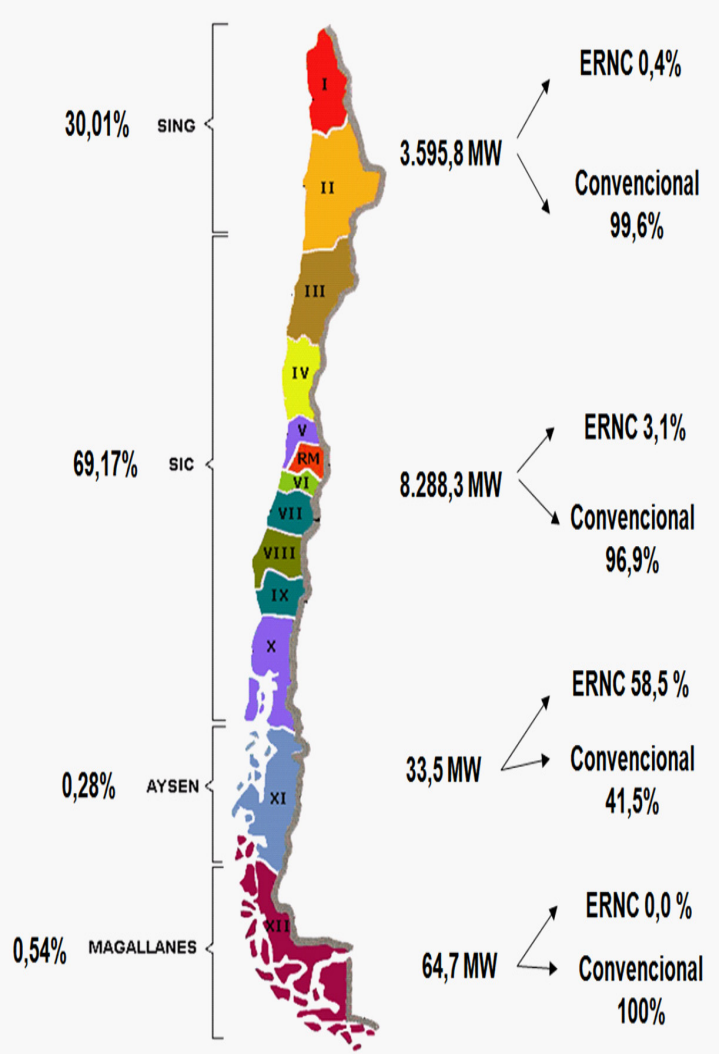
LE CHILI

en situation de concurrence. La principale société de transport d'électricité du pays, Transelec, appartient à la canadienne Brookfield Asset Management Inc. Cette situation empêche de développer des économies d'échelle car beaucoup de petites compagnies restent en présence. C'est la Commission Nationale de l'Energie (CNE) qui est responsable de réguler les prix et de fixer les politiques énergétiques. Les réformes dans les années 80 ont conduit à éloigner les pouvoirs politiques des décisions en remplaçant la régulation par un marché compétitif. En 2010, le système évoluera vers un système d'appel d'offres.

La figure et le tableau de cette page montrent les capacités installées de production électrique conventionnelle et non conventionnelle.

Le Chili ne se dit pas encore prêt pour le nucléaire, même s'il s'y intéresse à plus long terme, d'ici 2025 en prévision de la saturation des capacités hydrauliques et de la pénurie en charbon. Le réseau actuel ne permet pas de supporter une centrale de plus de 500MW et les projets nucléaires rentables se situent tous au dessus de 1000MW.
Le Chili présente un opportunité intéressante pour les entreprises souhaitant percer en Amérique du Sud : ses besoins énergétiques sont pressants, son gouvernement est démocratique depuis des années et sa gestion économique est stable.

	Source	SIC	SING	MAG	Aysén	Total
Sources Conventionnelles	Hydraulique >20 MW	4612.9	0.0	0.0	0.0	4612.9
	Comb. Fossiles	3422.1	3583.0	64.7	13.88	7083.7
	Total Conventionnelle	**9035.0**	**3583.0**	**64.7**	**13.9**	**11696.6**
Energies Renouvelables Non Conventionnelles	Hydraulique <20 MW	82.4	12.8	0.0	17.6	112.8
	Biomasse	170.9	0.0	0.0	0.0	170.9
	Eolienne	0.0	0.0	0.0	2.0	2.0
	Total ENRC	253.3.	12.8	0.0	19.6	285.7
	Total National	**8288.3**	**3595.8**	**64.7**	**33.5**	**11982.3**
	ENRC %	**3.1%**	**0.4%**	**0.0%**	**58.5%**	**2.4%**



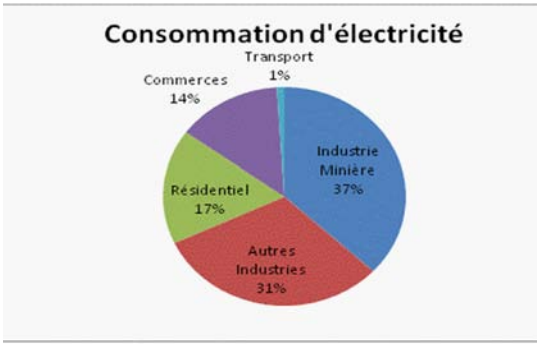
SANTIAGO

L'électricité au Chili

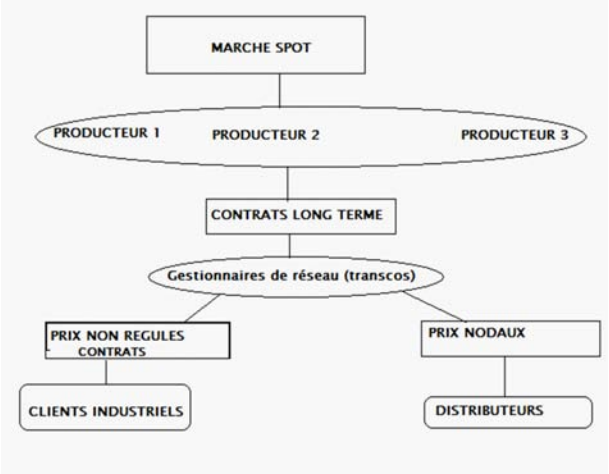
Lundi 9 Mars Matin

Le système électrique chilien, ses bilans d'énergie, ses capacités installées et son évolution nous ont été présentés par M. Sebastian Bernstein Sr. Ancien dirigeant de la commission Nationale de l'Energie et maintenant consultant.

Le bilan de consommation d'énergie primaire au Chili se présente comme suit : 38% de produits pétroliers, 21% de gaz naturel et 18% d'hydroélectricité. Dans le même temps, le pays importe 95% du pétrole et 70% du gaz naturel qu'il consomme. L'industrie minière constitue le principal pôle de consommation d'électricité. Le système électrique comprend quatre grands blocs interconnectés pour une puissance de 14,3 GW.



En 1978, les marchés des énergies fossiles est dérégulé pour permettre l'émergence de filières compétitives. En 1980, le secteur électrique a été partagé entre deux grands monopoles entreprises verticalement intégrés. A coté d'elles subsistaient quelques distributeurs. Puis la désintégration de ces deux monopoles s'est faite progressivement pour aboutir à la structure très désintégrée du marché électrique chilien actuel (aujourd'hui, on retrouve au total dans les blocs nord et centre :12 producteurs, 33 compagnies de distribution et 7 compagnies de transport d'électricité). En 2008, La production d'électricité a atteint 60,5 TWh. Jusqu'en 1997, le mix de production d'électricité au Chili était principalement composé par des centrales au charbon et des centrales hydrauliques ; quelques groupes diesel venant en appui cette production principale. A partir de 1997, le Chili signe un contrat d'approvisionnement de gaz argentin à bas prix, les projets de centrales à cycle combiné gaz se développent alors fortement (3,5 GW de puissance installée). Lorsque la crise du gaz argentin éclate en 2004, le prix d'approvisionnement du gaz naturel quintuple entrainant des augmentations importantes du prix de l'électricité au Chili. Cette pénurie de livraison du gaz argentin au Chili entrainera l'abandon de la plupart des projets d'installations de cycles combinés gaz. Les centrales au charbon et les groupes de production au diesel occupent, aujourd'hui, la plus grande part des investissements en nouveaux moyens de production.



Le marché électrique : structure et organisation. Une Commission Nationale de l'Energie s'occupe de la régulation et du contrôle du marché électrique. Il existe un marché SPOT qui sert uniquement à l'ajustement de court terme et où seuls les producteurs peuvent intervenir. Des contrats à long terme régissent les échanges entre les producteurs et les clients industriels et entre les producteurs et les distributeurs. Le dispatch central est basé sur la logique du « merit order ».L'ouverture du marché s'est faite depuis les années 80 et concerne la production et la distribution de l'électricité. L'investissement dans les actifs de production d'électricité est encouragé par une réglementation très peu contraignante et la facilité d'accès à ce marché pour les nouveaux opérateurs.

SANTIAGO

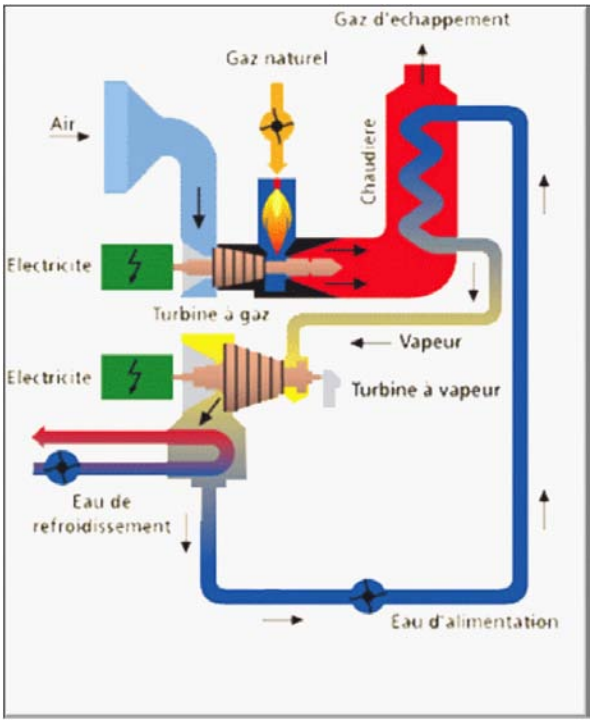
Centrale de Nueva Renca

Lundi 9 Mars matin

AES GENER

1er cycle combiné chilien, alimentant principalement la ville de Santiago.

Santiago et le nord du Chili sont principalement alimentés par des centrales électriques thermiques. A Santiago, cette production est cependant en partie supplée par la production plus rentable du barrage de la rivière Rapel lorsque les débits sont importants, en général de mai à septembre. La centrale Nueva Renca, mise en service en 1997, est exploitée par General Electric. AES Gener, propriétaire de l'usine, détient un contrat direct avec Chilectra, l'un des plus importants distributeurs d'électricité de Santiago. Prévue pour fonctionner au Gaz Naturel (GN) propane, sa conception lui permet aussi une alimentation au fioul. En 2004, la crise économique et énergétique argentine a provoqué la rupture d'importants contrats de gaz avec le Chili qui a par conséquent vu son mix énergétique largement modifié. Le mode de fonctionnement au fioul de Nueva Renca lui a alors permis de surmonter cette difficulté. Cette modification du combustible implique cependant des performances différentes et limite les températures de gaz de combustion. Les coûts de production sont notamment cinq fois plus élevés qu'avec une alimentation en GN. Actuellement, la centrale possède une puissance totale disponible de 350 MW. Elle est générée par une turbine à gaz de 200 MW et une turbine à vapeur d'une capacité nominale de 150 MW. Notons qu'avec une alimentation au gaz, 40% de la puissance délivrée par la turbine à combustion est utilisée pour comprimer le gaz qui y est injecté. Le schéma ci-dessous rappelle le fonctionnement général d'un cycle combiné.



1. Le combustible est comprimé avant d'être injecté dans la turbine à combustion.
2. Une fois le combustible brûlé, la turbine entraîne un alternateur qui produit l'électricité.
3. L'énergie thermique des fumées de combustion (600°C) est transférée à l'eau de l'échangeur fumée/eau qui se transforme en vapeur haute pression.
4. La vapeur est détendue à travers la turbine à vapeur.
5. On obtient en sortie de la vapeur basse pression qui est condensée à travers le condenseur.

Il est prévu d'installer une unité de dénitrification catalysée des fumées de combustion afin de respecter les normes légales d'émissions d'oxydes d'azote. A noter que l'usine émet 900 t de NOx par an en utilisant du fioul contre 300 avec une alimentation au GN. Nueva Renca emploie 40 personnes dont une majorité travaille en salle de contrôle. Cette dernière permet de commander toutes les unités de l'usine à distance. Lorsqu'un problème intervient et qu'il ne peut être directement résolu par les techniciens sur le terrain, des spécialistes de France, d'Angleterre et des Etats-Unis sont appelés pour sa résolution.

LA FARFANA

Station d'épuration

Nous arrivons en début d'un après-midi sous un soleil de plomb à la station de traitement des eaux usées La Farfana, réputée pour sa taille et sa modernité. D'une capacité de 7 m^3/s, soit plus de 600 000 m^3/j, l'usine traite les eaux usées de la moitié des 7,4 millions d'habitants de Santiago. Alors que l'eau de seulement 3% de la population de la capitale était traitée lors de la privatisation des réseaux d'eau urbains en 1999, ce taux atteignait 68% début 2009. Il est prévu que l'intégralité des effluents urbains de Santiago soit traitée d'ici 2010.

A l'entrée de l'usine, nous sommes accueillis par Monsieur Laurent Gestin, français et travaillant pour Degrémont (Suez Environnement) qui est en charge de l'exploitation de l'usine dont Aguas Andinas est le propriétaire. La Farfana est constituée d'une ligne de traitement d'eau et d'une ligne de traitement des boues produites lors de l'épuration des eaux. Ces traitements se décomposent comme suit :

Traitement des eaux

- Dégrillage : élimination des plus gros déchets.
- Dessablage-dégraissage : 8 bassins de 8m x 30 m.
- Décantation primaire : 16 ouvrages de 20 m x 65 m, profondeur entre 3,95 m et 4,6 m.
- Traitement biologique : 16 ouvrages de 11 000 m^3 chacun suivi de 16 clarificateurs (décantation des boues issues du traitement biologique) de 50 m de diamètre.
- Traitement de désinfection au chlore dans 4 bassins de contact totalisant 21 000 m^3.

Traitement des boues

- Epaississement gravitaire : 4 ouvrages de 26 m de diamètre.
- Flottation biologique (séparation liquide/solide) : 6 ouvrages de 20 m de diamètre.
- Digestion biologique anaérobique : 8 ouvrages de 34 m de diamètre pour une hauteur d'eau de 15,5 m chacun.
- Stockage du biogaz issu de la digestion dans 2 réservoirs
- Désulfurisation.
- Stockage des boues digérées : 3 réservoirs d'une capacité totale de 15 200 m^3.
- Déshydratation au moyen de 5 centrifugeuses.
- Séchage.

La STEP de la Farfana doit respecter les exigences particulièrement sévères imposées par les services publics chiliens. Habituellement, l'eau traitée dans une station d'épuration doit avoir des caractéristiques physicochimiques semblables à celles des eaux naturelles dans lesquelles elle est rejetée. Bien que l'eau traitée à La Farfana soit rejetée en rivière, elle doit respecter en sortie d'usine des taux de pollution carbonée comparables à ceux d'une eau potable. Il existe donc une unité de désinfection au chlore. Cependant le site ne contient aucune unité de traitement relative à l'azote ou au phosphate.

En moyenne, 450 t de boues sont produites par jour. Aujourd'hui, la loi chilienne ne permet pas de valoriser ces boues en agriculture ou en combustion. Elles sont donc directement acheminées vers des décharges municipales. Cependant, leur digestion permet la production d'un biogaz constitué essentiellement de CH_4 (60%) et de CO_2 (40%) qui peut être valorisé thermiquement. Une partie est utilisée sur le site pour alimenter les chaudières des digesteurs (à hauteur de 10% l'été et de 30% l'hiver). L'autre partie est traitée pour éliminer les sulfures d'hydrogène (H2S) qui passent d'un taux de 500 ppm à 25 ppm, les siloxanes et l'eau. Le biogaz est ensuite compressé et peut alimenter 30 000 foyers à travers le réseau de gaz de Metrogaz. L'arrêt de cette alimentation peut être commandé à distance directement depuis l'usine ou depuis les locaux de Metrogaz.

Fort de ces explications, nous reprenons notre route en direction de la société Metrogaz afin de mieux comprendre la gestion des réseaux de gaz.

Santiago

Station d'injection de gaz

Lundi 9 Mars après-midi

L'entreprise Metrogaz dessert la Region Metropolitana, qui désigne Santiago et sa périphérie. Cette entreprise a été créée en 1994 afin de desservir en gaz naturel la capitale chilienne, auparavant alimentée en gaz de ville. Le gaz de ville, mélange de dihydrogène et de monoxyde de carbone de relativement faible pouvoir calorifique, était produit par reformage de combustible fossile, principalement du charbon. En 1995 Metrogas décida de

convertir le réseau de la ville de Santiago en réseau de gaz naturel, combustible moderne, moins dangereux que le monoxyde de carbone, moins polluant et meilleur marché.

Mais à partir de 2004, la distribution de gaz naturel va s'avérer difficile à cause de la crise énergétique en Argentine. Suite à un manque d'investissement dans les infrastructures énergétiques, conjugué à un taux de croissance de l'économie relativement élevé, l'Argentine se retrouve en effet dans une situation de pénurie énergétique. Le gouvernement argentin interdit alors aux entreprises argentines de vendre le gaz à l'étranger. Les entreprises argentines, normalement soumises à une obligation de livraison, invoquent un cas de force majeur pour s'y soustraire. Or le Chili s'approvisionnait quasiment exclusivement auprès de l'Argentine. La conversion de l'ancien réseau de gaz de ville en réseau de gaz naturel a donc été stoppée et il reste actuellement 10% des clients qui sont approvisionnés en gaz de ville.

Le gaz de ville, formé habituellement à partir de charbon ou de pétrole, est actuellement produit en partie à partir de biogaz provenant de l'usine d'assainissement des eaux usées de La Farfana. Le méthane de ce biogaz est transformé en syngaz par réaction avec l'eau en présence d'un catalyseur, NiO_2.

$$CH_4 + H_2O \rightarrow 3H_2 + CO$$

Une réaction de water gaz shift permet ensuite de convertir le CO obtenu en dihydrogène et CO_2.

$$CO + H_2O \rightarrow H_2 + CO_2$$

Le biogaz permet d'alimenter 30 000 habitants en gaz de ville, sur les 405 000 consommateurs que dessert l'entreprise. Afin de régler ces problèmes d'approvisionnement en gaz naturel, Metrogas participe actuellement à la construction d'un terminal GNL dans la baie de Quintero. Les entreprises énergétiques chiliennes attendent beaucoup de ce terminal, qui permettra au Chili de retrouver plus d'indépendance et plus de stabilité sur le plan énergétique.

Quintero

Centrales Charbon

Mardi 10 mars : visite du chantier des centrales au charbon

AES GENER

Situées à Nuevas Ventanas et Campiche à Quintero, sur le littoral chilien, à environ 100 km au Nord-Ouest de Santiago.

Nous avons été reçus par Raúl Eduardo Julio Acuña Gajardo et Emilio Jofre, respectivement ingénieur de projet et responsable sécurité sur ce site en construction de deux centrales au charbon, dénommées Nueva Ventanas et Campiche. Localisées dans la Ve région de Valparaíso, ces deux unités sont dimensionnées à respectivement 267 et 270 MW de puissance. Leurs mises en service sont prévues pour janvier 2010 (Nueva Ventanas) et Mai 2011 (Campiche), où elles viendront s'ajouter aux deux unités du site déjà opérationnelles d'une capacité de 338 MW.

Ce chantier est placé sous la responsabilité de l'énergéticien AES GENER S.A., société chilienne possédant à ce jour 16 centrales pour une production de près de 3000 MW, filiale de l'entreprise américaine AES Corp. Ce chantier d'un budget de 110 milliards de pesos chiliens, soit 145 millions d'euros, emploie près de trois mille personnes.

Le principal maître d'œuvre est l'entreprise coréenne Hyundai, chargée notamment de la livraison de la chaudière. Comme pour les deux unités déjà en place, le charbon qui alimentera la centrale arrivera par bateau au terminal de Quintero. Afin de limiter la pollution de l'air par les poussières typiques de ces régions sèches, les piles de charbon devront être arrosées régulièrement et seront isolées des vents par un système de bâches.

Lors de notre parcours sur le chantier, nous avons vu les prises d'eau destinées au refroidissement, captée directement dans l'océan qui jouxte le chantier. Le dessalement par osmose inverse sera assuré par des appareils de technologie israélienne. Pour éviter les problèmes de corrosion, les conduites de captage et d'évacuation sont réalisées en matériau polymère.

La chaudière, ainsi que les unités de traitement des fumées étaient en cours d'installation lors de notre visite. Le chantier ayant pris du retard, les chefs de chantier devaient gérer la livraison et la mise en place de matériel sur un chantier pas assez avancé.

L'accent a été mis sur l'intégration environnementale du chantier, AES GENER S.A. ayant financé la réhabilitation d'une rive du cours d'eau jouxtant la centrale en parcours piétonnier arboré. Néanmoins, des différents avec les riverains du projet existent quant aux conséquences environnementales du projet, notamment sur une des activités moteur de l'économie régionale, la pêche.

CODELCO

Mine de Cuivre

Mercredi 11 mars : visite des Mines de Cuivre de Chuquicamata, dans le Désert de l'Atacama (Exploitant : Coldelco, division Codelco Norte).

Après deux heures de vol à destination de Calama, nous nous dirigeons vers la ville minière de Chuquicamata. Entre volets fermés, portes murées et vitres cassées nous découvrons une ville fantôme, la place du village est déserte. Pour seule présence le grincement des balançoires de la vieille école au rythme du vent…

Fin février 2007, les 20 000 habitants se sont vus dans l'obligation de quitter la ville pour rejoindre Calama afin de préserver leur santé : l'exploitation de la mine rejette en effet des gaz toxiques.
Nous sommes rassurés par l'arrivée de notre charmante guide, Paula, qui nous dirige vers l'ancienne épicerie de la ville, transformée en office depuis peu. A l'intérieur, elle nous explique le fonctionnement de la mine et son histoire.

Le complexe minier de Chuquicamata a tout d'abord été investi par la famille Guggenheim dans les années 1910, pour ensuite être nationalisé à 100% sous Salvador Allende en 1971.
Le site regroupe trois mines en activité : Minart, Minachuqui, Mina Sur. Une quatrième est prévue: Calama.
Sur le site, le gisement se situe sur une faille qui s'écarte de 2 cm par jour. Le minerai se décompose entre l'oxyde de cuivre au plus prés de la surface et les sulfates de cuivre plus en profondeur.

Deux procédés pour deux structures :

* Pour les sites de Minart et Mina Sur, riches en oxydes, le processus d'extraction se fait par hydrométallurgie. Le minerai est disposé sur une toile en polyéthylène, puis arrosé par de l'acide sulfurique pour récupérer le cuivre. Ce procédé de lixivation dure 70 jours et est peu coûteux.

* Le site de Minachuqui, quant à lui est la plus grande mine mondiale à ciel ouvert, avec 1 km de profondeur pour une circonférence de plusieurs kilomètres. Les sulfates de cuivre y sont extraits. Le process nous a été expliqué pendant la visite des installations : il s'agit d'un procédé par pyrométallurgie de 14 jours extrêmement coûteux. Ce site fonctionne 24 heures sur 24 avec un effectif de 200 personnes.

Armés de notre équipement minier (masque, lunettes, gilet…), nous découvrons les installations et les procédés de fabrication : tous les jours, des explosions fractionnent la roche pour permettre l'agrandissement de la mine. Seulement 1/3 des 600 000 tonnes de pierres extraites par jour vont dans le process. Les sulfates sont emmenés par camions (capacité 120 tonnes) vers les broyeurs qui concassent la pierre. La pierre moulue est ensuite acheminée par tapis roulant dans des dômes de stockage. A cet instant, la poudre ne contient que 1% de cuivre, il s'en suit un processus de flottaison. La matière est placée dans des grands bains chimiques qui permettent d'extraire le molybdène et le cuivre des sédiments.
Après cette étape, la matière contient seulement 33% de cuivre, les quatre passages dans les fours successifs permettent d'augmenter la pureté à 99.7%.
Les plaques de cuivre obtenues après fonderie, font ensuite l'objet d'une électrolyse permettant d'atteindre une pureté de 99.99%.

Tous les déchets de la mine sont conservés pour un possible futur recyclage, on parle d'un procédé bactériologique qui pourrait voir le jour d'ici quelques années.

Ainsi 800 000 tonnes de cuivre et 20 000 tonnes de molybdène sont exportés chaque année.
Nous remercions la compagnie Codelco pour cette impressionnante visite.

El TATIO

Potentiel géothermique ?

Jeudi 12 mars 2009: visite des Geysers d'El Tatio, dans le désert de l'Atacama

Les Geysers d'El Tatio sont situés au milieu de la Cordillère des Andes sur l'altiplano dans le désert d'Atacama, au nord du Chili. Ces geysers se trouvent à 4300 m d'altitude dans la région d'Antofagasta, au pied des volcans Tatio et Linzor (5610m) et du Cerro Linzor (4380m), à 90 km au nord de San Pedro de Atacama, et à environ 125 km à l'est de Calama.

Nous nous sommes rendus sur ce site, le jeudi 12 mars 2009 à l'aube afin que la différence de température entre l'air extérieur (-8°C environ) et les geysers (86°C) soit propice pour observer la formation des cheminées de vapeur.

Le nom « El Tatio » provient du mot « el tata » qui signifie « grand frère » dans l'Atacama. D'après une légende locale, le volcan El Tatio à environ

10 km au sud-est de la zone géothermale d'El Tatio, «le grand frère», protège les peuples de l'Atacama. Selon la légende, ce volcan leur a donné la force des geysers pour plusieurs siècles.

Avec près de 80 geysers actifs et une surface de plus de 30 km^2, El Tatio est le plus grand site de geysers de l'hémisphère sud, et la troisième plus grande zone géothermale au monde.
Malgré le nombre important de geysers, ceux-ci ne sont pas très hauts. La hauteur moyenne des éruptions est de 75 centimètres ; l'éruption la plus haute pouvant atteindre 6 mètres. La zone géothermale se trouve dans une dépression nord-sud, de 7 km de large et de 20 km de long qui s'est formée lors du plissement des Andes à l'ère tertiaire.

L'eau issue des précipitations et de la fonte des neiges s'infiltre à une vingtaine de kilomètres au sud-est d'El Tatio. Elle suit un système de failles orientées nord-ouest / sud-est, s'enfonce et circule sous terre pendant une quinzaine d'années. A une vitesse d'environ un kilomètre par an, l'eau passe à travers différentes couches terrestres. Entre 800 et 1000 m de profondeur, l'eau est alors piégée et réchauffée et atteint 260°C. Seule une petite partie de cette eau chaude, plus légère, remonte au nord-ouest et donne en surface les geysers et les sources chaudes de la zone d'El Tatio. Ces eaux chaudes forment la rivière du Rio Salado dont le débit varie de 250 à 500 litres par seconde suivant la saison. La plupart des sources atteignent 86°C, la température d'ébullition de l'eau à 4300m d'altitude.

Sept forages profonds de 870 à 1820 mètres ont été creusés entre 1969 et 1974 pour exploiter cette chaleur géothermique et alimenter en électricité la mine de cuivre de Chuquicamata et la ville de Calama situées à plus d'une centaine de kilomètres de là. Il reste d'ailleurs une ancienne centrale géothermique expérimentale sur la partie sud-est du plateau des geysers d'El Tatio, abandonnée en 1974, à la suite de problèmes techniques.

Un équipement pour la désalinisation de l'eau a aussi été mis en place mais pour des raisons techniques ces installations sont aujourd'hui totalement abandonnées.

SALAR de l'ATACAMA

Réserve de Lithium

Jeudi 12 mars 2009 : Salar de l'Atacama

Cette visite était en lien avec le livre que nous écrivons sur l'épuisement des ressources

telles que le lithium et les conséquences sur le développement des énergies non fossiles. En effet, le Salar de l'Atacama est l'un des plus grands gisements de lithium au monde.

Le Salar de l'Atacama se trouve dans la région d'Antofagasta, à 55km au sud de San Pedro d'Atacama, au pied des volcans Licancabur et Lascar, l'un des volcans le plus actif du Chili. Ce Salar est entouré par la Cordillère des Andes à l'est, et par la chaîne de montagne nommée Cordillère de Domeyko à l'ouest. Les alentours du Salar sont peuplés de trois espèces de flamants : le flamant des Andes, le flamant du Chili et le flamant de James.

Le Salar de l'Atacama s'étend sur 100 km de long et 80 km de large, avec une superficie de l'ordre de 3000 km². Il se trouve à une altitude d'environ 2300 mètres.

Ce Salar est le plus grand dépôt salin du Chili (1400km²). Sous le Salar se trouve un lac salin, caché par la croûte solide de sel. Le sel du Salar provient de la dissolution des sels du sol volcanique de la région environnante, par les eaux apportées par les précipitations sur la chaîne andine toute proche.

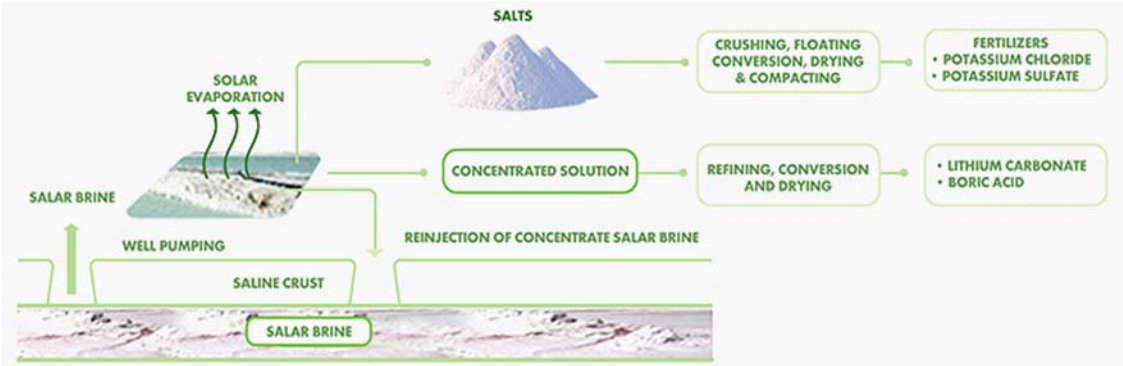
Ces eaux s'infiltrent et s'accumulent dans le sol, se chargeant de sels. Puis les eaux s'évaporent et les sels apportés s'accumulent, formant une croûte solide de sels minéraux. Cette croûte de sels minéraux est cimentée par les poussières amenées par le vent du désert. Les petites rivières issues de la fonte régulière des neiges andines des sommets environnants s'écoulent vers la cuvette du Salar créant ainsi de multiples oasis, lieu privilégié du développement de la culture des Indiens Atacamas

Le Salar de l'Atacama : un trésor de sel et de minéraux

Les cavités du Salar sont remplies de saumure riche en sodium, potassium, magnésium, lithium et bore. Le lithium est présent dans des flaques de sel, et l'extraction s'effectue au sein des nappes phréatiques après évaporation.

Le Salar de l'Atacama contient 27% des réserves mondiales connues de lithium. Le Chili est devenu le premier exportateur mondial depuis 1997 avec près de 40% du lithium mondial provenant du Salar de l'Atacama.

Principe d'extraction des minéraux du Salar de l'Atacama.



COMMISION NATIONALE DE L'ÉNERGIE

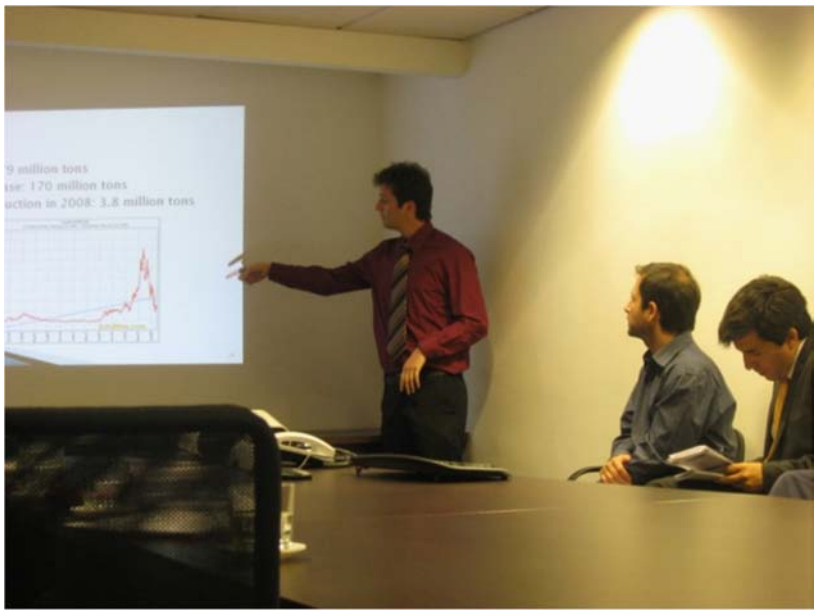
Présentation de notre conférence

Vendredi 13 mars : Commission Nationale de l'Energie

Commission Nationale de l'Energie

C'est un vendredi 13 mars que nous nous retrouvons tous devant les bâtiments de la Commission Nationale de l'Energie (CNE), Programme Pays pour l'Efficacité Energétique de Santiago. Pendant vingt minutes, nos brillants conférenciers expliquèrent aux spectateurs (membres du CNE et de la mission économique de l'Ambassade de France) les recherches que nous avons menées depuis le début du Mastère sur l'épuisement des ressources non fossiles utilisées par les énergies renouvelables. Comme le rappelèrent Paul et Audrey, l'épuisement des ressources fossiles et les changements climatiques conduisent à donner aux énergies renouvelables une importance grandissante. Mais sont-elles totalement renouvelables ? Notre démarche cherche à évaluer si un développement ambitieux de ces énergies ne se heurtera pas à des ressources limitées à long terme. Anne-Laure et Elodie ont ensuite présenté le scénario de l'IIASA (International Institute for Applied System Analysis) sur lequel nous avons basé notre étude et la courbe d'Hubbert que nous avons utilisée pour évaluer le pic de consommation des ressources minérales. Guillaume était chargé de la partie photovoltaïque, attirant l'attention sur l'indium utilisé dans la technologie CIGS. Un dernier exemple était donné par Nicolas sur le plomb utilisé dans les batteries avant qu'Alexandre ne conclue notre exposé sur le travail que nous espérons publier en septembre.

Les questions qui ont suivi ont été d'un grand intérêt puisque c'était notre première confrontation à un avis d'experts extérieurs. Le système chilien est très libéralisé et les marchés jouent un rôle prépondérant. Pour le pétrole, l'augmentation des prix avait favorisé les investissements en prospection et conduit à la découverte de nouveaux champs et à une extraction plus poussée. Le marché influence donc les réserves que nous essayons d'estimer pour la courbe d'Hubbert. Notre approche considère en fait le marché comme une sortie du problème puisque notre objectif est d'estimer si, physiquement, les ressources matérielles pour le développement des énergies renouvelables sont disponibles pour permettre d'atteindre les objectifs prévus. Nous avons choisi de na pas considérer les réserves - qui dépendent des technologies, des investissements et du marché - mais de nous baser sur les ressources- qui représentent l'ensemble connu ou prévu du minerai présent physiquement dans le sol. La courbe d'Hubbert est établie sur le long terme, passant outre les fluctuations temporaires.



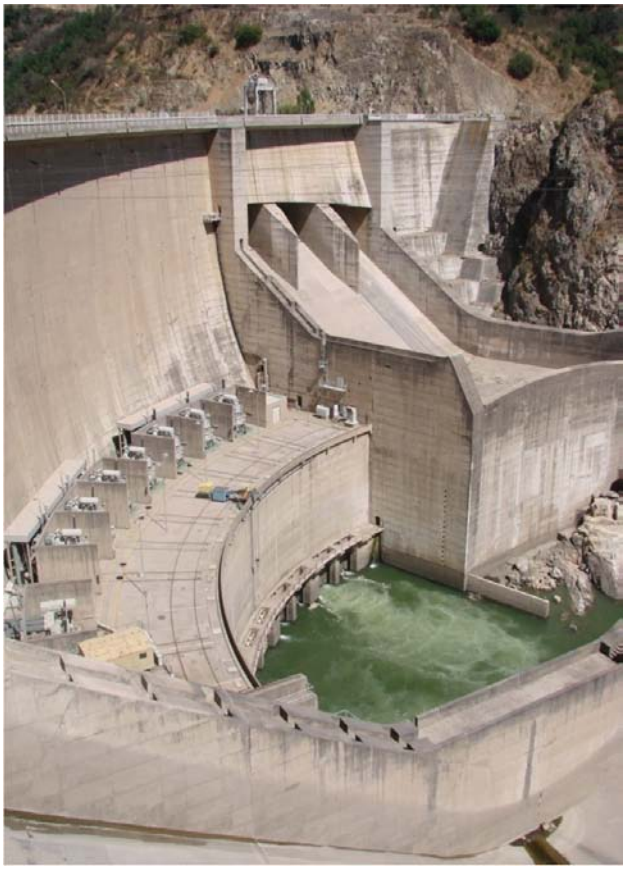
Une dernière question portait sur les technologies de stockage présentées. Nous avions choisi de nous attarder sur les batteries au plomb, plus susceptibles d'être sujettes à un épuisement que les autres technologies de stockage mécaniques par exemple tout en étant une technologie bien développée. Dans nos hypothèses, les batteries au plomb représenteront seulement un dixième des besoins en stockage. Les autres technologies seront abordées dans l'ouvrage final.

Nous remercions enfin Messieurs Fernandez et Gamboa et leurs collègues pour leur accueil, leur intérêt et les conseils et contacts qu'ils nous ont donné. C'est ainsi que nous avons pu mesurer toute la richesse d'un échange avec une autre culture, une autre vision de l'énergie.

BARRAGE RAPEL

Centrale hydroélectrique

Samedi 14 mars 2009: visite du barrage de Rapel.



A 120 km au sud-ouest de Santiago, le barrage Rapel (ENDESA) retient avec majesté la rivière du même nom. Le premier aperçu met directement dans le bain : le barrage est impressionnant. Dans le bassin en amont 700 millions de m³ d'eau se préparent à livrer de l'électricité par la récupération de l'énergie gravitationnelle et cinétique qu'elle détient. Mais le barrage n'a pas qu'une vocation énergétique : il permet également la gestion des crues, dont, tous les mille ans en moyenne, le débit atteint des records de 9000 m³/s. La dernière en date ? Celle de 1982 avec une quantité d'eau évacuée par les déversoirs au rythme de 8000m³/s. Le barrage canalise donc les flux de la rivière, mais il fait bien plus en convertissant l'énergie de l'eau en électricité. Cette énergie est réservée à une utilisation stratégique, en direction des ministères à Santiago, des hôpitaux et des prisons.
Notre visite a été riche et complète : tout le dispositif nous a été détaillé et nous avons pu évoluer au travers des installations. Des turbines, aux générateurs, jusqu'au départ des lignes haute tension.

De la technique à l'anecdote !

Un peu de technique ?

377 MW installés, cinq turbines Francis nécessitant un débit minimum de 120 m³/s pour fonctionner.
7 transformateurs monophasiques, assemblés trois par trois, le dernier servant de sécurité en cas de défaillance.

Une anecdote ?

Pour retenir l'eau lors de la construction en 1960, un tunnel de 600 m a été creusé dans la roche afin de dévier le cours du fleuve. Nous en avons aperçu l'entrée : impressionnante !

Nous remercions profondément l'équipe qui nous a accueillis, dont la générosité et la bonne humeur nous laisseront un souvenir mémorable !

Partenaires

Remerciements

Toute l'équipe du Mastère OSE tient à remercier vivement toutes les personnes ayant participé à la préparation de ce voyage.

M. Sebastian BERNSTEIN Fils, de METROGAS et ancien élève de la promotion 2005 du Mastère OSE pour toute l'organisation de ce voyage d'étude sans qui ce dernier n'aurait pu avoir lieu. Ainsi que JUANA pour son accueil à l'Aculeo qui restera inoubliable.

M. Sebastian BERNSTEIN Père, pour son accueil et son brillant exposé de la situation électrique chilienne.

Mme Monica GIMPEL, attachée Commerciale de la Mission Economique de l'Ambassade de France au Chili pour l'organisation de la visite à la Commission Nationale de l'Energie et pour ses précieux conseils.

Mme Bernardita Escobar de l'agence Travel Security pour son efficacité dans l'organisation de la logistique locale.

Toutes les personnes qui ont été sollicitées dans l'organisation des visites.

Enfin nous tenons à remercier tout particulièrement tous les intervenants et organisateurs de toutes les visites et conférences de cette semaine. L'accueil qui nous a été réservé fut chaleureux et admirable. Nous avons apprécié la qualité et la pertinence des interventions ainsi que la disponibilité et la compétence des intervenants.

Partenaires

METROGAS

CODELCO

endesa chile

AGUAS andinas

AES GENER

Commission Nationale de l'Energie

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

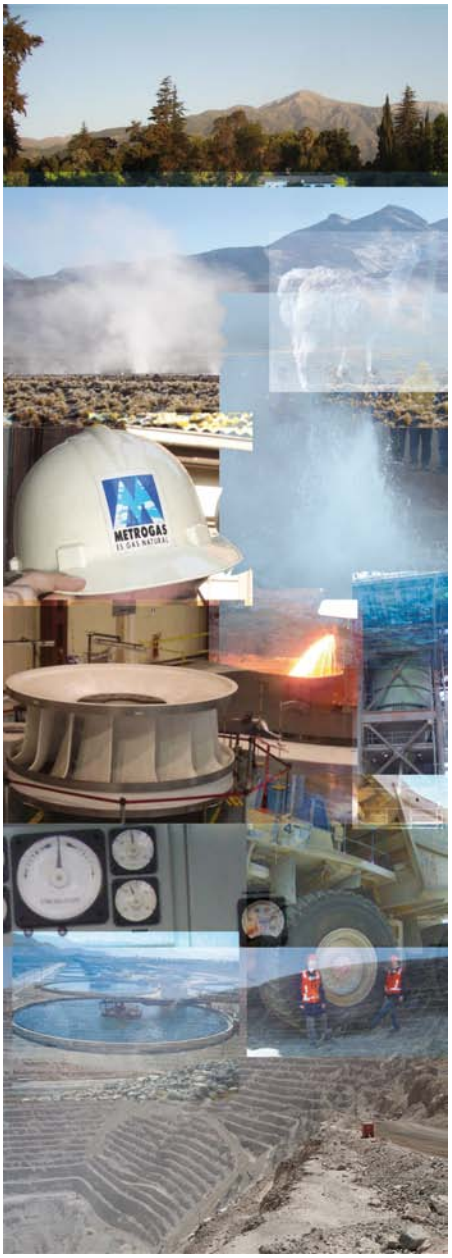
Mission Economique de l'Ambassade de France au Chili

CONTACTS

Informations

MINES PARISTECH
MASTÈRE OSE
Rue Claude Daunesse
B.P. 207
06904 SOPHIA ANTIPOLIS cedex
Tel : +33 4 93 95 74 46
Fax : +33 4 97 15 70 71

Contact :
M. Gilles Guerassimoff
gilles.guerassimoff@mines-paristech.fr



CONTACTS

SANTIAGO

M. Sebastian BERNSTEIN Sr.
Consultant

GENER AES
Nueva Renca

M. Alfonso PACHO
alfonso.pacho@aes.com

M. Marcelo RUBIO
marcelo.rubio@aes.com

M. Orlando BAHAMONDEZ
orlando.bahamondez@aes.com

GENER AES
ELECTRICA VENTANAS

M. Raul Edouardo Julio ACUNA GAJARDO
Chef d'équipe
raul.acuna@aes.com

M. Emilio JOFRE J.
Prévention des risques
emilio.jofre@aes.com

M. Alfonso PACHO
alfonso.pacho@aes.com

AGUAS Andinas
Station de la FARFANA

M. Esteban AREVALO MEDEL
Chef des opérations
earevalo@aguasandinas.cl

M. Laurent GESTIN
Directeur
lgestin@aguasandinas.cl

METROGAS

M. Sebastian BERNSTEIN Jr.
sbernste@metrogas.cl

M. Rob Stirling
rstirlin@metrogas.cl

M. Klaus Lührmann
kluhrman@metrogas.cl

COMMISSION NATIONALE DE L'ENERGIE
GOUVERNEMENT DU CHILI

M. Ignacio FERNANDEZ AMUNATEGUI
Coordinateur des Affaires Internationales
ifernandez@cne.cl

M. Marcel SILVA GAMBOA
Coordinateur des études
msilva@cne.cl

SAN PEDRO DE ATACAMA

CODELCO

Mme. Cristina Nieves MESINA ABADAL
Direction de la communication
CMesina@codelco.cl

Mme. Caterina ESCALANTE ZAMORANO
Direction de la communication
CEscalante@codelco.cl

Mme. Paula ALVARADO
Unité des relations publiques
VISITAS@codelco.cl

RAPEL

ENDESA CHILE

M. Manuel Antonio ALVARES ROSALES
maar@endesa.cl

M. Juan Alberto OLIVA VASQUEZ
jaov@endesa.cl

SANTIAGO

MISSION ECONOMIQUE DE
L'AMBASSADE DE FRANCE AU CHILI

Mme. Monica GIMPEL
Attachée Commerciale
monica.gimpel@missioneco.org

M. Xavier FREVAL de COATPARQUET
Conseiller Commercial
xavier.fravaldecoatparquet@missioneco.org

TRAVEL SECURITY

Mme. Bernardita ESCOBAR
Agence de Voyage
bescobar@security.cl

MINES ParisTech