

Rapport final, 31 décembre 2002

Développement des turbines à basses chutes

Laboratoire de mini-hydraulique de Montcherand

Auteur et coauteurs	Vincent DENIS
Institution mandatée	MHyLab, Fondation du laboratoire de mini-hydraulique de Montcherand
Adresse	1354 Montcherand
Téléphone, e-mail, site Internet	024 442 87 87, info@mhylab.com , www.mhylab.ch
N° projet / n° contrat OFEN	26'749 / 67'370
Durée prévue du projet (de - à)	1998 à 2002

RÉSUMÉ

Les installations « Basse chute » sont équipées de turbines axiales. Celles-ci présentent un grand nombre de variantes, généralement dictées par la hauteur de chute et par le débit.

L'analyse technico-économique de ces variantes, pour le domaine considéré des PCH, et la prise en compte de l'objectif fondamental MHyLab (simplicité, performance et fiabilité), a conduit aux choix suivants :

- Axe de rotation vertical, ce qui implique une disposition en forme de S.
- Le turbo-groupe, de la sortie de la vanne à l'entrée du diffuseur, est une machine compacte qui peut être entièrement pré-montée en atelier et, dans le cas d'une révision, facilement démontable en un bloc, au moyen d'une grue mobile, à travers le toit de la petite centrale.
- Les pales de la roue Kaplan sont orientables en marche en fonction du débit, par contre, l'ouverture du distributeur est fixe.

Le but de ce projet est de développer une gamme de turbines axiales correspondant au domaine de chute compris entre 3 et 30 m et de mettre les résultats obtenus au service des PME actives dans la branche. Le projet financé par l'OFEN est englobé depuis juin 2001 dans un projet de R&D plus large, financé par la Suisse et l'Union Européenne.

Le présent rapport fait état des travaux qui ont conduit au développement de la famille des turbines à 4 pales et à la réalisation d'un site de démonstration.

Table des matières

1	OBJECTIF	4
2	CADRE DU PROJET SEARCH.....	5
3	COLLABORATIONS NATIONALES ET INTERNATIONALES	6
3.1	COLLABORATIONS NATIONALES	6
3.2	COLLABORATIONS INTERNATIONALES	6
4	DÉMARCHE ADOPTÉE.....	6
5	DESCRIPTION SUCCINCTE DU PROJET	7
6	RÉSUMÉ DES TRAVAUX EFFECTUÉS ENTRE 1998 ET 2000 (PHASE PRÉPARATOIRE)	8
6.1	ETUDES PRELIMINAIRES ET PREDIMENTIONNEMENT	8
6.2	MODELISATION NUMERIQUE DE L'ECOULEMENT DANS LE COUDE D'ENTREE.....	8
6.3	CALCULS HYDRAULIQUES DE L'AUBAGE MOTEUR D'UNE ROUE A 4 PALES.....	9
6.4	ETUDE DE CONSTRUCTION MECANIQUE DE LA MACHINE D'ESSAIS.	9
6.5	ETUDE CONSTRUCTIVE DU MECANISME DE COMMANDE DES PALES.....	9
6.6	REDACTION DES DOCUMENTS D'APPEL D'OFFRES, DEPOUILLEMENT DES OFFRES ET COMMANDE DE LA TURBINE D'ESSAI.	9
6.7	CONSTRUCTION ET MONTAGE DE LA TURBINE D'ESSAI.	9
7	TRAVAUX EFFECTUÉS EN 2001 ET 2002	10
7.1	TRAVAUX DE LABORATOIRE.....	10
7.1.1	<i>Mise au point de la turbine d'essai</i>	10
7.1.2	<i>Travaux effectués sur le stand d'essai.....</i>	10
7.1.3	<i>Travaux de réglage et étalonnage des installations de mesure</i>	11
7.1.4	<i>Travaux de mise en service du stand en circuit fermé</i>	11
7.1.5	<i>Etude numérique de l'écoulement dans le distributeur</i>	11
7.1.6	<i>Réalisation d'un nouveau distributeur cylindrique à angle variable.....</i>	12
7.1.7	<i>Réalisation d'un nouveau distributeur conique</i>	12
7.1.8	<i>Etude numérique de l'écoulement dans la roue</i>	12
7.1.9	<i>Etude numérique de l'écoulement en sortie de roue et dans le diffuseur</i>	12
7.1.10	<i>Réalisation de nouvelles ogives de roue</i>	12
7.1.11	<i>Réalisation de nouveaux aspirateurs</i>	13
7.1.12	<i>Sondages d'écoulement</i>	13
7.1.13	<i>Conception et installation d'un guideau de fourreau d'arbre.....</i>	13
7.1.14	<i>Conception et commande d'un nouveau distributeur.....</i>	14
7.1.15	<i>Essais de rendement.....</i>	14
7.1.16	<i>Essais de cavitation.....</i>	14
7.1.17	<i>Mesure du couple de commande des pales</i>	15
7.1.18	<i>Etude et calculs de la version 8 pales</i>	15
7.2	AUTRES TRAVAUX	15
7.2.1	<i>Conception industrielle</i>	15
7.2.2	<i>Paramétrisation et synthèse</i>	15
7.2.3	<i>Conception de la machine des Farettes</i>	15
7.2.4	<i>Conception de la machine de St-Bueil</i>	15
7.2.5	<i>Construction de la machine des Farettes.....</i>	15
7.2.6	<i>Dissémination.....</i>	16

8 APPRÉCIATION DU TRAVAIL ACCOMPLI, CONCLUSIONS ET SUITE A DONNER ..	16
ANNEXE 1 EXTRAITS DES RESULTATS DES CALCULS NUMERIQUES D'ÉCOULEMENT DANS LE COUDE D'ENTREE.....	18
ANNEXE 2 EXTRAITS DE L'ETUDE CONSTRUCTIVE DE LA TURBINE D'ESSAI	22
ANNEXE 3 PHOTOS DU MONTAGE DE LA TURBINE D'ESSAI.....	24
ANNEXE 4 MESURE DU COUPLE DE FROTTEMENT DU PALIER À EAU	29
ANNEXE 5 SONDAGES D'ÉCOULEMENT	31
ANNEXE 6 EXEMPLES D'ANALYSES D'ÉCOULEMENTS	36
ANNEXE 7 VUES DU DISTRIBUTEUR À AUBES INTERCHANGEABLES	43
ANNEXE 8 VUES DES AUBES POUR LA VERSION 8 PALES	45
ANNEXE 9 VUE DU GUIDEAU DU FOURREAU D'ARBRE.....	47
ANNEXE 10 PHOTOS DE LA CONSTRUCTION DE LA TURBINE ET DU MONTAGE SUR SITE À LA CENTRALE DES FARETTES	49

1 OBJECTIF

Dans le cadre du programme Energie 2000, remplacé par Suisse Energie, la Confédération favorise la construction et la remise en service de petites centrales hydro-électriques.

Une des conditions clés du succès de cette politique est que les petites turbines équipant ces aménagements répondent aux exigences fondamentales de :

- Faible coût de construction et de maintenance.
- Rendement énergétique élevé et garanti.
- Fiabilité maximale et entretien aisé.

La seule solution à même de répondre à l'ensemble de ces critères est de mettre la technique hydraulique nécessaire à disposition des PME réalisant des petites centrales.

Dans cette optique, le laboratoire de mini-hydraulique de Montcherand (MHyLab) a été créé fin 1993 et développe des petites turbines, spécifiques à la mini-hydraulique, depuis 1997.

Pour MHyLab, l'année 2000 marque l'achèvement, avec succès, du développement des petites turbines à haute chute (turbines Pelton). Un nombre réjouissant de petits aménagements performants de moins de 20 kW jusqu'à près de 1'000 kW et sous des hauteurs de chute variant de 70 à plus de 500 m ont déjà été réalisés sur la base de cette technique, ou sont en cours de construction.

Une étude ayant démontré que le potentiel de réalisation de turbines correspondant aux basses chutes est très important, que ce soit en Suisse, en Europe ou dans le monde, MHyLab a tout naturellement axé ses efforts de recherche sur ce domaine de la mini-hydraulique.

En 1999, grâce au financement de l'OFEN (Fr. 540'000.-), MHyLab a lancé son programme de recherche sur les turbines à basse chute (3 à 30 m). Les subsides complémentaires de RDP-CREE (Fr. 60'000,-) et du PSEL (Fr. 300'000,--) ont permis de redémarrer le projet dans le courant de l'année 2000.

En outre, l'année 2001 marque un tournant important pour le projet Basse chute, puisque celui-ci a fait l'objet d'une proposition dans le cadre des projets Energie co-financés par la Suisse et l'Union Européenne. Celle-ci ayant été acceptée et les contrats signés entre juin et novembre, le projet pourra aller beaucoup plus loin que ne le prévoyait la version initiale, objet du présent rapport. L'extension implique sept partenaires, dont 4 industriels. Elle prévoit la réalisation de deux sites de démonstration. Le nom choisi pour ce projet est SEARCH LHT, pour Small Efficient Axial Reliable Compact Hydro Low Head Turbine. Son contexte est indiqué dans le chapitre 2 du présent rapport.

Le présent rapport fait l'état du projet au 31 décembre 2002, date d'achèvement du volet financé par l'OFEN.

2 CADRE DU PROJET SEARCH

Pour tenir l'objectif fixé par le Livre Blanc visant à couvrir 12% des besoins énergétiques de l'Union Européenne par les énergies renouvelables, d'ici à 2010, la Commission Européenne souhaite installer, en Europe, une puissance supplémentaire de 4'500 MW en petite hydraulique.

Il s'agit d'un objectif important si l'on considère que la majorité des sites de puissance élevée sont déjà équipés. L'effort est donc à réaliser dans les faibles puissances (inférieures à 1 000 kW). Outre les nouvelles réalisations, une part importante de cet objectif pourra être réalisé en réhabilitant les nombreux sites basse chute actuellement abandonnés ou en mauvais état.

La Suisse poursuit des objectifs similaires en matière de développement des énergies renouvelables, notamment dans le cadre du programme Suisse Energie.

Le projet SEARCH LHT vise à développer un concept innovant de groupe hydroélectrique de type KAPLAN, propre à la petite hydraulique. L'expérience montre en effet qu'il ne s'agit pas de réaliser un aménagement de petite taille comme un simple modèle réduit de grande centrale, mais qu'il convient, au contraire, de concevoir des équipements et solutions constructives propres à ce domaine, ceci de manière systématique. Le but n'est donc pas de définir un matériel standard, mais bien un concept permettant de réaliser des installations sur mesure pour un prix inférieur aux équipements standardisés actuellement sur le marché.

La réussite d'un projet de petite hydraulique dépend essentiellement de trois critères qui sont simplicité, fiabilité et garanties de performances. C'est uniquement en répondant à ces trois exigences que l'on pourra valablement développer le potentiel de réhabilitation et de constructions de petits aménagements basse chute, dont la rentabilité est actuellement trop souvent difficile à atteindre.

Le respect de ces trois critères, s'appliquant à l'ensemble de la centrale, permettra en outre d'abaisser les coûts de construction, production et exploitation, augmentant ainsi le potentiel techniquement et économiquement réalisable en Europe et dans le monde.

Les développements en laboratoire seront validés par une phase industrielle comprenant la réalisation de deux sites de démonstration en Suisse (Les Farettes) et en France (St-Bueil).

Ce projet contribue donc de manière importante à la tenue des objectifs fixés par l'Union Européenne et la Suisse en matière d'énergies renouvelables.

Pour aborder les problèmes d'hydraulique que traditionnellement seuls les constructeurs de grandes turbines ont les moyens techniques et financiers de résoudre (plate-forme d'essais), il était indispensable de regrouper plusieurs partenaires complémentaires (constructeurs, laboratoires et exploitants) au sein d'un consortium. Par ailleurs les compétences en la matière étant relativement peu nombreuses et disséminées dans plusieurs pays, il convenait de mettre en commun les efforts de plusieurs entreprises et instituts pour réaliser ce projet de développement, digne d'intérêt au niveau national et européen.

3 COLLABORATIONS NATIONALES ET INTERNATIONALES

3.1 COLLABORATIONS NATIONALES

Comme indiqué, le projet est soutenu par le PSEL depuis 2000, dans le cadre du projet No 204, intitulé Développement des turbines basses chute.

L'extension du projet dans le cadre des programmes européen (voir paragraphe 5.2) nous a par ailleurs conduit à collaborer activement avec Romande Energie SA, propriétaire d'un site de démonstration, et le Laboratoire de machines hydrauliques de l'EPFL (sondages d'écoulement).

3.2 COLLABORATIONS INTERNATIONALES

Depuis juin 2001, le projet OFEN est intégré dans le projet financé par l'UE et l'OFES, dont les références sont : NNE5/2000/247 et 00.0373-1. Son nom est SEARCH LHT.

Cette extension implique la collaboration avec les entreprises SASSO snc, spécialiste du contrôle commande italien, THEE, fabricant français de petites turbines, le laboratoire des écoulements géophysiques et industriels de l'Ecole nationale supérieure de mécanique et d'hydraulique de Grenoble (INPG-LEGI) et la Société d'exploitation des énergies renouvelables, producteur indépendant français accueillant un site de démonstration pour une turbine à 8 pales.

4 DEMARCHE ADOPTEE

La démarche adoptée par MHyLab est similaire à celle ayant fait ses preuves pour les turbines Pelton.

Le travail consiste à concevoir une gamme de turbines faisant appel à nombre d'éléments standards ou facilement réalisables par des PME.

Il s'agit d'explorer systématiquement le domaine de fonctionnement de chaque type de machine (dans le cas présent la basse chute), de manière à pouvoir fournir le profil hydraulique exactement adapté aux caractéristiques du site considéré.

La réalisation d'essais systématiques en laboratoire permet, d'une part, de valider la démarche et, d'autre part, d'offrir des garanties de fonctionnement et de performance comme pour les grandes machines.

En résumé, l'on pourrait dire que la démarche consiste à répondre à la question : Jusqu'où peut-on simplifier les formes hydrauliques susceptibles d'entraîner une réduction sensible des coûts, sans dégrader les performances au-delà des limites imposées par les contraintes de rentabilité du projet ?

5 DESCRIPTION SUCCINCTE DU PROJET

Les installations « Basse chute » sont équipées de turbines axiales. Celles-ci présentent un grand nombre de variantes, généralement dictées par la hauteur de chute et par le débit. L'axe du groupe, par exemple, peut être vertical, horizontal ou incliné. Le générateur peut être situé à l'intérieur du conduit hydraulique (groupe-bulbe ou groupe-puits). Il peut être aligné avec l'axe de la turbine ou dévié de 90° au moyen d'un renvoi d'angle, etc...

L'analyse technico-économique de ces variantes, pour le domaine considéré des PCH, et la prise en compte de l'objectif fondamental MHyLab (simplicité, performance et fiabilité), a conduit aux choix suivants :

- Axe de rotation vertical, ce qui implique une disposition en forme de S.
- Le turbo-groupe, de la sortie de la vanne à l'entrée du diffuseur, est une machine compacte qui peut être entièrement pré-montée en atelier et, dans le cas d'une révision, facilement démontable en un bloc, au moyen d'une grue mobile, à travers le toit de la petite centrale.
- Les pales de la roue Kaplan sont orientables en marche en fonction du débit, par contre, l'ouverture du distributeur est fixe.

Les objectifs scientifiques et techniques de la phase de R&D de ce projet sont :

- ⇒ Développer, optimiser et tester un concept systématique **innovant** de petits groupes hydro-électriques destinés aux aménagements basse chute répondant aux critères de simplicité, performance et fiabilité
- ⇒ Couvrir le domaine de chute compris entre 3 et 30 m, pour une puissance maximale de 1MW,
- ⇒ Réduire le temps nécessaire au développement des turbines en utilisant largement le calcul numérique (Méthodes Euler et Navier Stokes),
- ⇒ Effectuer les essais en laboratoire correspondant à la meilleure solution numérique,
- ⇒ Développer un concept industriel sur la base des développements de turbines en laboratoire,
- ⇒ Développer un logiciel de dessin automatique permettant la livraison d'un profil hydraulique de petite turbine (y compris ses garanties de performance) correspondant parfaitement aux caractéristiques de l'aménagement à réaliser ou à rénover, en l'espace d'une à deux semaines,
- ⇒ Abandonner la méthode de la turbine standard au profit du design systématique sur mesure, pour un prix similaire, voire inférieur,
- ⇒ Garantir le fonctionnement hydro-dynamique des petites turbines comme pour les grandes installations.
- ⇒ Permettre une réduction des coûts de construction et d'exploitation,
- ⇒ Mettre à disposition des constructeurs suisses et européens de petites turbines une technique performante sûre et garantie, aujourd'hui encore financièrement inaccessible.

Les objectifs scientifiques et techniques de la phase de **démonstration** sont de :

- ⇒ Mettre en pratique les techniques développées durant la phase de R&D,
- ⇒ Evaluer la réduction des coûts de construction et d'exploitation,
- ⇒ Evaluer la fiabilité des techniques développées,
- ⇒ Assurer une industrialisation de techniques développées,
- ⇒ Offrir une vitrine technologique faisant office de référence,
- ⇒ Assurer une large diffusion des techniques développées.

6 RESUME DES TRAVAUX EFFECTUES ENTRE 1998 ET 2000 (PHASE PREPARATOIRE)

6.1 ETUDES PRELIMINAIRES ET PREDIMENTIONNEMENT

La première étape du travail a consisté à analyser les techniques déjà expérimentées, de manière à éviter de recommencer des travaux déjà existant et à parvenir plus rapidement à une solution originale applicable à la petite hydraulique. Ces travaux ont été utilisés en particulier pour la définition du programme de travail ainsi que du concept global (axe vertical, palier à eau, rapport diamètre de moyeu-diamètre de roue de 0.6, etc.).

6.2 MODELISATION NUMERIQUE DE L'ECOULEMENT DANS LE COUDE D'ENTREE.

L'un des buts du projet SEARCH est de réaliser une machine compacte, monobloc. L'un des éléments essentiels pour y parvenir est de dévier l'écoulement amont au moyen d'un conduit coudé à angle droit. Afin d'éviter une trop grande perte de charge et d'assurer un écoulement aussi uniforme que possible à l'entrée du distributeur de la turbine, il a été décidé de travailler avec des ailettes de guidage de l'écoulement à l'intérieur du coude.

Quatre géométries différentes du coude d'entrée de la machine ont été définies, trois d'entre elles comportant des ailettes de guidage. Elles ont été fournies aux étudiants du Pr. Kueny de l'INPG, actuel partenaire du projet, pour effectuer un calcul d'écoulement, nous permettant de déterminer quelle variante serait construite pour la machine d'essai.

Les résultats obtenus ont clairement démontré que le meilleur choix possible était celui d'un coude à section carrée.

Cette étape était essentielle, car nous devions nous assurer que les perturbations dues au changement de direction de l'écoulement et au fourreau de passage de l'arbre machine étaient limitées par la présence des ailettes de guidage.

6.3 CALCULS HYDRAULIQUES DE L'AUBAGE MOTEUR D'UNE ROUE A 4 PALES.

Le choix avait été fait de commencer le développement de la gamme "basse chute" par une machine à 4 pales. En vue du dépôt de proposition dans le cadre du 5^{ème} PCRD, nous avions choisi de dimensionner la machine d'essai en similitude avec une turbine correspondant aux caractéristiques du site des Farettes, l'un des deux projets de démonstration actuel.

Nous avons ainsi réalisé l'ensemble des calculs hydrauliques de l'aubage directeur et de l'aubage moteur, qui a ensuite été modélisé à l'aide d'un logiciel de CAO 3D.

6.4 ETUDE DE CONSTRUCTION MECANIQUE DE LA MACHINE D'ESSAIS.

L'étude constructive a consisté dans une première étape à réaliser un dessin d'ensemble de la turbine d'essai, ainsi qu'un dessin d'implantation sur le stand.

La seconde étape a consisté à étudier et réaliser les dessins de détail de l'ensemble des pièces de la machine en vue de sa réalisation.

6.5 ETUDE CONSTRUCTIVE DU MECANISME DE COMMANDE DES PALES.

Plusieurs variantes ont été étudiées de manière à rechercher un mécanisme de commande des pales à l'intérieur du moyeu de la roue aussi simple que possible, fonctionnant toujours en traction, ne nécessitant pas de lubrification à l'huile, facilement réalisable par des PME.

Un accent particulier a été également porté à la recherche d'un concept unique, quel que soit le nombre de pales.

6.6 REDACTION DES DOCUMENTS D'APPEL D'OFFRES, DEPOUILLEMENT DES OFFRES ET COMMANDE DE LA TURBINE D'ESSAI.

Un appel d'offre pour la réalisation de la turbine d'essai a été lancé auprès de plusieurs entreprises locales. Le dossier fourni comportait un dossier de plans, une notice descriptive et un document spécifiant les conditions contractuelles.

Suite au dépouillement, un fournisseur a été sélectionné et la construction de la turbine d'essai a débuté mi-2000.

6.7 CONSTRUCTION ET MONTAGE DE LA TURBINE D'ESSAI.

Les principales tâches effectuées par MHyLab ont consisté à suivre la construction, à effectuer la réception du matériel en atelier et à commencer le montage sur le stand.

7 TRAVAUX EFFECTUÉS EN 2001 ET 2002

7.1 TRAVAUX DE LABORATOIRE

7.1.1 Mise au point de la turbine d'essai

En cours de montage, divers défauts de fabrication de la turbine d'essai sont apparus. Il a été nécessaire de les corriger avant de pouvoir commencer les essais.

Il faut toutefois remarquer que cette mise au point est normale, puisque c'est la première fois qu'une machine de ce type est réalisée.

7.1.2 Travaux effectués sur le stand d'essai

Bien que la plupart des travaux relatifs aux infrastructures d'essai ait été effectué durant la phase de mise au point de la turbine, il est apparu nécessaire d'entreprendre certaines modifications et améliorations sur le stand MHyLab. Il s'agit de :

- **Rigidification de la turbine.** Les prototypes industriels seront construits dans un châssis rigide ou partiellement en bétonnés dans la centrale. Par contre la machine d'essai, telle que montée sur le stand MHyLab, est uniquement suspendue au dynamomètre. Il s'est avéré que sa rigidité n'était pas suffisante pour assurer des essais précis et nous avons dû construire un dispositif permettant de palier à l'absence de châssis.
- **Modification du déversoir de la pompe à vide.** La pompe à vide est utilisée pour les essais de cavitation. Lors du premier essai de ce type, il est apparu nécessaire d'améliorer le déversoir, ce qui a été fait.
- **Modification de la balance.** La mesure du couple sur les turbines à réaction, dites rapides, est caractérisée par, en comparaison avec les essais des turbines à action du type Pelton, par une grande vitesse de rotation et un faible couple moteur. Ainsi, des erreurs négligeables dans la mesure de couple pour des turbines Pelton ne le sont pas pour des turbines axiales.
Nous avons donc été amenés à améliorer cette mesure, essentiellement en rigidifiant, là également, les éléments mécaniques de transmission des forces à la balance dynamométrique.
- **Mise en service d'un plotter.** Nous avons ajouté un plotter au système d'acquisition et mesure. Le programme de gestion de cet équipement, réalisé par nos soins, permet de tracer, en cours d'essai, des courbes $\varphi-\Psi$, $\varphi-\eta$, $\psi-\eta$ et $\sigma-\eta$.
- **Remplacement du palier à eau.** Suite à un défaut d'alimentation en eau lors d'un essai de cavitation, le palier en caoutchouc de la turbine a subi un échauffement excessif qui l'a endommagé. Devant le remplacer, nous avons opté pour un nouveau palier en fibre composite, dont les caractéristiques semblent mieux correspondre à notre application.
- **Mise en place d'une sécurité d'alimentation d'eau pour le palier.** Un système de vanne à flotteur a été installé sur le déversoir de la turbine permettant de maintenir le niveau d'eau constant et d'assurer en tout temps une alimentation suffisante en eau du palier turbine.

- Etude et déplacement du pupitre de commande dans un local insonorisé. Le niveau sonore dans le laboratoire étant particulièrement élevé (plus de 90 dB) et présentant un danger réel pour les opérateurs, une étude a été réalisée pour déplacer le système de commande et d'acquisition dans le bureau insonorisé attenant au. L'augmentation du niveau sonore relativement à celui constaté durant les essais Pelton est due à l'utilisation des deux groupes de pompage, de 115 kW chacun, permettant la circulation de l'eau dans le circuit d'essai. Ces travaux ont pu être réalisés durant une période de fabrication de pièces nécessaires à la poursuite des essais.

7.1.3 Travaux de réglage et étalonnage des installations de mesure

Afin de garantir la validité des mesures effectuées durant les essais, un accent particulier a été mis sur la vérification, le réglage et l'étalonnage de la chaîne de mesure. Nous pouvons en particulier citer :

- Etalonnage en usine des capteurs de pressions (mesures de chute et de débit),
- Réglage et étalonnage de la balance de précision (mesure du couple),
- Vérification de l'interchangeabilité des tuyères de mesure du débit (recouvrement et stabilité de mesure),
- Vérification de la mesure de vitesse de rotation,
- Mesure du couple de frottement du palier à eau de la turbine (palier en caoutchouc et palier en matériau composite).

7.1.4 Travaux de mise en service du stand en circuit fermé

Le stand d'essai ayant fonctionné en circuit ouvert depuis avril 1997 (programme haute chute), nous avons dû procéder à un certain nombre de vérifications et réglages avant de pouvoir lancer la campagne d'essais.

En outre, nous avons eu à déplorer un problème de grippage sur un des deux groupes de pompage, ce qui a rendu nécessaire son démontage complet afin d'effectuer les réparations nécessaires.

Parmi les travaux de mise en service, nous pouvons citer les plus importants :

- Démontage, contrôle et mise en service de la pompe à vide (essais de cavitation)
- Contrôle et mise en service de la pompe No 1
- Mise en service de la pompe No 2, après réparation.

7.1.5 Etude numérique de l'écoulement dans le distributeur

En collaboration avec le Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels (LEGI) de l'Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), nous avons réalisé plusieurs calculs d'écoulement dans le distributeur.

7.1.6 Réalisation d'un nouveau distributeur cylindrique à angle variable

Les résultats des calculs d'écoulement réalisé par l'INPG-LEGI nous ayant montré que le distributeur pouvait être amélioré, nous en avons fait fabriquer un nouveau, cette fois-ci avec un aubage cylindrique à angle variable, à la place du cylindrique à angle constant précédemment installé.

Les essais effectués suite à ce changement ont montré que le centre de la colline de rendement se rapprochait du point théorique de calcul. Il n'y a par contre pas eu d'amélioration notable du niveau de rendement (env. 1 point).

7.1.7 Réalisation d'un nouveau distributeur conique

Dans le but d'optimiser l'écoulement à l'entrée de la roue, nous avons réalisé un troisième distributeur, à ailettes coniques.

Les essais réalisés ont permis de montrer que l'écoulement présentait une meilleure stabilité, mais que l'angle d'ouverture choisi était trop grand. Il en résulte que l'écoulement n'est pas adapté à la roue et que le niveau de performance atteint n'est pas satisfaisant.

Les considérations faites sur la stabilité d'écoulement nous ont toutefois amené à poursuivre le développement dans cette voie.

7.1.8 Etude numérique de l'écoulement dans la roue

Un calcul d'écoulement dans la roue a également été réalisé par le LEGI. Il a permis de vérifier que l'aubage conçu par MHyLab pour la machine 4 pales fonctionnerait théoriquement bien. Le résultat donne un rendement de transformation d'énergie par la roue de plus de 97% (roue seule).

7.1.9 Etude numérique de l'écoulement en sortie de roue et dans le diffuseur

Les divers calculs numériques réalisés par le LEGI mettaient en évidence un décollement de l'écoulement en sortie de roue et dans le diffuseur.

Ces divers constats pouvant expliquer le niveau de rendement trop bas de la turbine par rapport à l'objectif visé, MHyLab a étudié 4 nouvelles configurations de diffuseur, ainsi que trois nouvelles ogives de roues.

Le LEGI a ensuite effectué les calculs numériques pour plusieurs combinaisons d'ogive et de diffuseurs, afin de déterminer quelle est à priori la meilleure solution permettant de tenir les objectifs de simplicité, efficacité et fiabilité.

7.1.10 Réalisation de nouvelles ogives de roue

Trois ogives de roue beaucoup plus longues que le modèle original et s'approchant des ogives classiques observées sur les turbines Kaplan en exploitation, ont été réalisée avec des angles de 8, 12 et 14 degrés. De nouveaux essais de rendement ont été effectués avec celles-ci et les résultats sont satisfaisants, puisque le gain obtenu sur le rendement mécanique de la machine est de l'ordre de 6 points par rapport à la version de base.

La comparaison des résultats d'essai nous a permis d'arrêter l'angle optimal à 14 degrés. Les travaux en laboratoire ont également porté sur la recherche de la longueur minimale nécessaire pour assurer une qualité d'écoulement satisfaisante dans l'ensemble diffuseur-aspirateur.

7.1.11 Réalisation de nouveaux aspirateurs

Rappelons que l'aspirateur est constitué d'un cône d'aspiration directement sous la roue, d'un coude et d'un diffuseur.

Suite à l'analyse des résultats obtenus en calcul numérique, il a été décidé de lancer la fabrication d'un nouveau diffuseur, cylindrique, à double cône.

L'analyse des lois de sections laissait en outre prévoir que le phénomène de décollement de l'écoulement serait ainsi évité.

Les travaux d'optimisation de l'ensemble "aspirateur" nous ont conduit à réaliser deux cônes d'aspiration, deux coudes et deux diffuseurs. La configuration optimale est désormais arrêtée (cône d'aspiration 12 degrés, coude à section cylindrique, diffuseur à section cylindrique et double cône).

Les essais réalisés avec celle-ci ont permis d'observer une faible augmentation du niveau de rendement d'environ 1 point par rapport à la situation antérieure.

7.1.12 Sondages d'écoulement

Le Laboratoire de Machines Hydrauliques de l'EPFL nous a mis à disposition son matériel de sondage d'écoulement et a formé notre personnel.

De nombreux sondages correspondant aux diverses configurations testées ont été réalisés en trois sections (sortie distributeur, sortie roue et sortie cône d'aspiration).

Ces mesures nous ont permis de déterminer avec précision la nature de l'écoulement dans chacun des cas et ainsi de rechercher l'optimum hydraulique permettant de tenir nos objectifs en matière de rendement.

Ces mesures sont menées en parallèle avec les essais de rendement. Elles sont par ailleurs utiles au LEGI qui effectue les simulations numériques et a besoin de valider son code de calcul en vue du développement de l'ensemble de la gamme. Celui-ci n'étant pas encore au point et les délais pour obtenir des résultats étant trop longs, nous avons eu largement recours aux sondages dans le but d'analyser l'écoulement et apporter les modifications nécessaires sur la machine d'essai.

Celle-ci est actuellement équipée de 17 axes de sondages répartis de la manière suivante :

- 4 axes à l'amont du distributeur
- 5 axes entre le distributeur et la roue
- 4 axes en sortie de roue
- 4 axes en entrée de coude de l'aspirateur.

7.1.13 Conception et installation d'un guideau de fourreau d'arbre.

Ayant pu observer une légère dissymétrie de l'écoulement en amont du distributeur, nous avons réalisé un guideau d'arbre dans le but d'améliorer le sillage de celui-ci. Les résultats obtenus montrent une amélioration de la répartition de vitesse, ainsi qu'un gain de 0.5 point de rendement à régime nominal.

Cette modification, n'est à priori pas à adopter pour les turbines 4 pales (basses chutes), mais sera utile pour les machines à 6, 7 ou 8 pales, lorsque les vitesses d'écoulement sont plus élevées.

7.1.14 Conception et commande d'un nouveau distributeur.

La synthèse des essais et sondages réalisés ont permis de déterminer que le distributeur cylindrique se comporte moins bien que le distributeur conique en matière de stabilité de rendement. Par contre l'angle testé était mieux adapté, ce qui donne un niveau de rendement plus élevé. Cette configuration a été adaptée pour la turbine des Farettes.

Fort des ces constats, nous avons décidé la construction d'un nouveau distributeur à 12 ailettes coniques. Celles-ci sont conçues de manière à être interchangeables, ce qui nous permettra de gagner du temps lors des changements d'angle et ainsi de pourvoir rapidement déterminer une colline Kaplan. Ce distributeur est en cours de fabrication.

7.1.15 Essais de rendement

Pour chacun des modifications apportées à la machine, nous réalisons une série d'essais de rendement et traçons une colline partielle ou complète.

Le niveau de rendement mécanique actuellement atteint par le modèle de laboratoire est de l'ordre de 88.5% à 89 %, qu'il faut comparer au 82% obtenus avec la première configuration testée début 2001.

Si l'on considère les lois de similitude et d'effet d'échelle, l'objectif d'un rendement de 90% est atteint pour les machines de taille moyenne du type de celle du site de démonstration des Farettes.

Les divers essais réalisés et actuellement en cours laissent supposer qu'un potentiel d'amélioration existe encore au niveau du distributeur. Il est donc nécessaire de poursuivre le développement de cette partie de la machine pour deux raisons :

1. l'objectif de performance devant être également tenu pour de petites machines,
2. les développements réalisés dans une configuration 4 pales doivent être totalement achevés avant de lancer l'étude des configurations 6 et 8 pales.

Les essais effectués montrent que la stabilité du rendement, en fonction des variations de débit, est excellente.

7.1.16 Essais de cavitation

Aucun essai de cavitation n'ayant été réalisé avant le montage de la turbine Kaplan sur le stand, un travail important durant le second semestre 2001 fut la mise au point de la procédure pour ce type de fonctionnement.

Une série de tests préliminaires ont pu être réalisés en vue de la réalisation de la turbine destinée à la petite centrale des Farettes, premier site de démonstration.

Le comportement de la turbine d'essai en cavitation sera analysé de manière complète dès que la configuration définitive sera adoptée.

7.1.17 Mesure du couple de commande des pales

Un dispositif de mesure du couple de commande des pales de la turbine a été conçu et réalisé.

Les mesures effectuées ont permis de vérifier la tendance à la fermeture recherchée, ainsi que de fournir les indications nécessaires à THEE pour le dimensionnement de son dispositif de commande des pales de la turbine des Farettes.

7.1.18 Etude et calculs de la version 8 pales

Le développement de la turbine à 4 pales ayant pris du retard relativement au programme initial, le développement de la variante à 8 pales n'a pas progressé autant qu'il l'aurait dû. Néanmoins, un important travail de recherche de documentation et de dimensionnement préliminaire a été effectué. Le tracé d'aubage est terminé.

La réalisation des pièces nécessaires sera lancée une fois la configuration finale 4 pales arrêtée. Les offres sont déjà en notre possession.

Relevons que les travaux nécessaires à la mise au point de la turbine 4 pales devraient permettre un développement plus rapide des versions 8, 7, 6 et 5 pales).

7.2 AUTRES TRAVAUX

7.2.1 Conception industrielle

MHyLab et THEE ont tenu plusieurs séances consacrées à la conception mécanique des turbines dans une optique industrielle. Les échanges ont notamment porté sur les paliers à eau, le choix des matières, la réalisation du coude à section carrée, la réalisation des aspirateurs, etc.

7.2.2 Paramétrisation et synthèse

Tous les développements entrepris pour la conception des machines à 4 et 8 pales l'ont été dans l'optique d'une systématisation. Les principales dimensions ont été paramétrées et les formules d'évolution seront affinées au fur et à mesure que les essais s'effectueront.

7.2.3 Conception de la machine des Farettes

Les essais réalisés à ce jour ont permis à MHyLab de fournir le profil hydraulique complet de la turbine des Farettes, ainsi que diverses valeurs de dimensionnement telles que couple sur les tourbillons de pales, vitesse d'emballlement, etc.

7.2.4 Conception de la machine de St-Bueil

MHyLab a réalisé un dimensionnement préliminaire de la turbine de St-Bueil de manière à fixer les grandes lignes du projet.

7.2.5 Construction de la machine des Farettes

La machine des Farettes a été construite entre mars et août 2002. Montée sur site entre septembre et octobre 2002, elle est en marche probatoire depuis début décembre 2002.

Une inauguration officielle aura lieu en 2003. Cette centrale servira de vitrine du projet.

7.2.6 Dissémination

Le projet basse chute a fait l'objet de plusieurs publications et présentations. Parmi les plus importantes, nous pouvons citer :

- mention du programme dans une présentation effectuée aux Rencontres de l'Hydroélectricité de Grenoble du 29 novembre 2001, dont le titre est "Développement systématique et outils CAO pour la petite hydraulique".
- édition d'un article dans le bulletin d'information MHyLab, Hydroscoop, publié en août 2002.
- Présentation de la conférence : Développement systématique de petites turbines axiales – Le projet SEARCH LHT, Vincent DENIS, Jean-François BANSARD, Andrea SASSO, Société Hydrotechnique de France, Hidroenergia 2002, Mulhouse.
- Présentation de la conférence : CFD and laboratory tests for small axial turbines development : the SEARCH LHT project, Vincent DENIS, Jean-François BANSARD, Andrea SASSO, Conference proceedings, Hydro 2002, Kemer, Turquie.
- Publication de l'article Neue Familie von kompakten Niederdruckturbine, Das Kleinkraftwerk, Nr 52, Decembre 2002.
- Le programme SEARCH LHT, un projet hélvético-européen, Revue des énergies renouvelables, No 6 – 2002, SSEs.

8 APPRECIATION DU TRAVAIL ACCOMPLI, CONCLUSIONS ET SUITE A DONNER

La difficulté de trouver le complément du financement, les importants travaux de mise au point effectués en 2001, les délais de livraison des calculs d'écoulement et la complexité du projet liée à son caractère innovant ont impliqué un retard important dans son accomplissement relativement au programme contractuel.

Il faut toutefois remarquer que l'ensemble de tâches effectuées à ce jour est indispensable à la poursuite du projet. Si nous avons visiblement sous-estimé le temps nécessaire à la mise au point de la configuration 4 pales, nous sommes cependant confiants quant au délai global du projet qu'il devrait être possible de tenir.

Comme nous en avons régulièrement informé l'OFEN et la direction de programme par le biais de nos rapports semestriels et annuels, le projet initial a profondément changé de par le fait de sa transformation en projet de R&D d'importance internationale.

Le financement OFEN a été décisif pour lancer ces travaux. Il est notoire que nous avions sous-estimé la difficulté de mise au point de la turbine 4 pales. Ce constat, lié au fait que le programme s'est étoffé (par exemple par l'ajout de sites de démonstration), implique que l'objectif initial du projet OFEN n'est pas atteint pour l'instant, puisque nous n'avons pas encore achevé le projet 8 pales.



Au terme du volet OFEN, il convient de relever les succès tels que la mise en service d'une première machine industrielle, la tenue des objectifs en matière de simplicité et performance, ainsi que l'achèvement du développement d'une gamme à 4 pales.

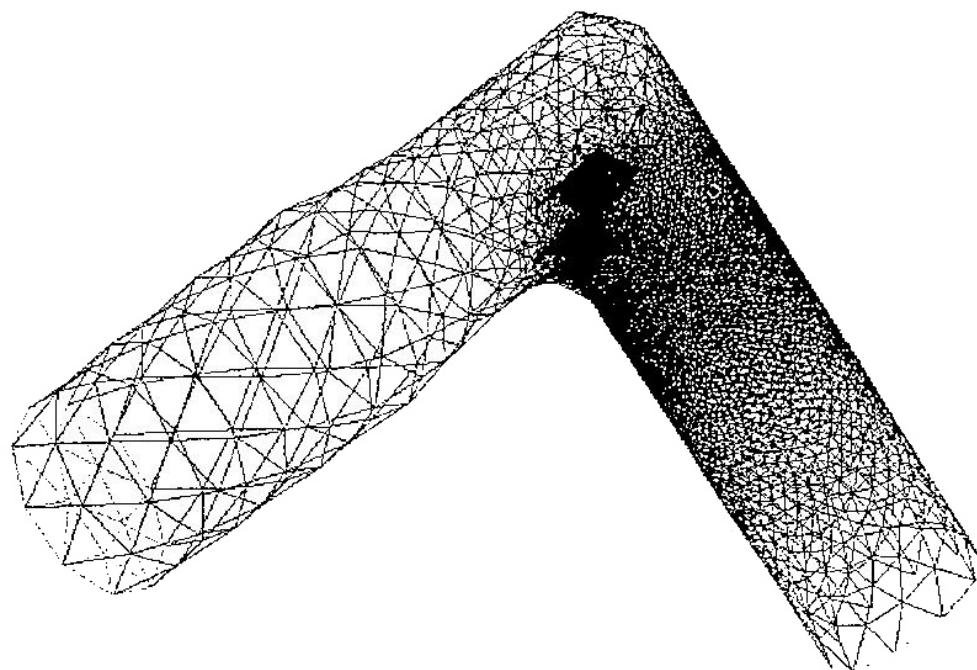
Le projet SEARCH LHT permettra de poursuivre les efforts entrepris grâce à l'OFEN et de mettre sur le marché une gamme complète répondant aux besoins du domaine des basse chutes.

MHyLab

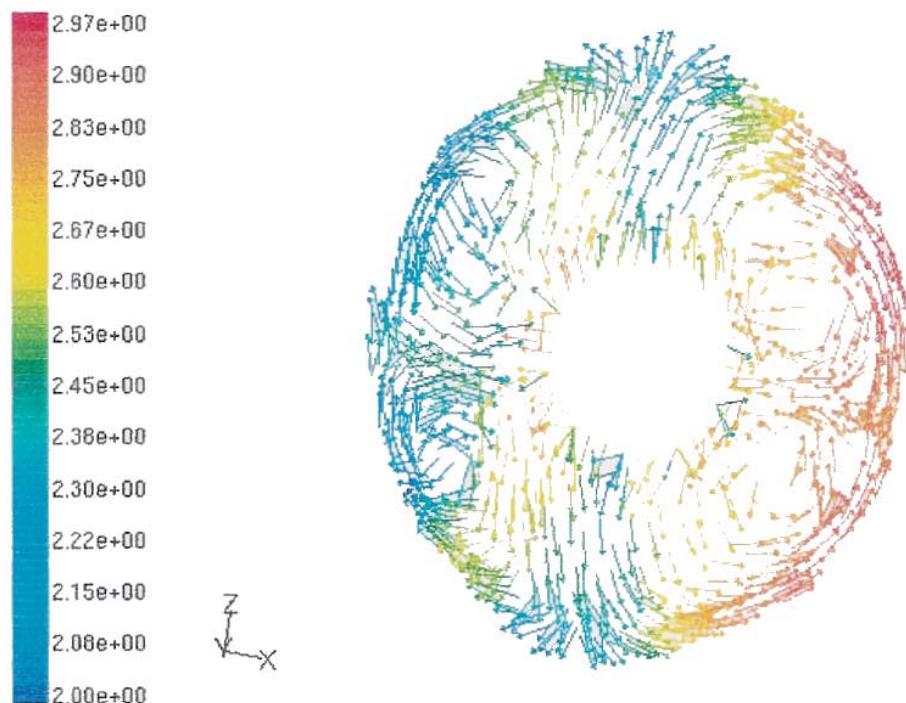
Vincent DENIS
Responsable du laboratoire

ANNEXE 1

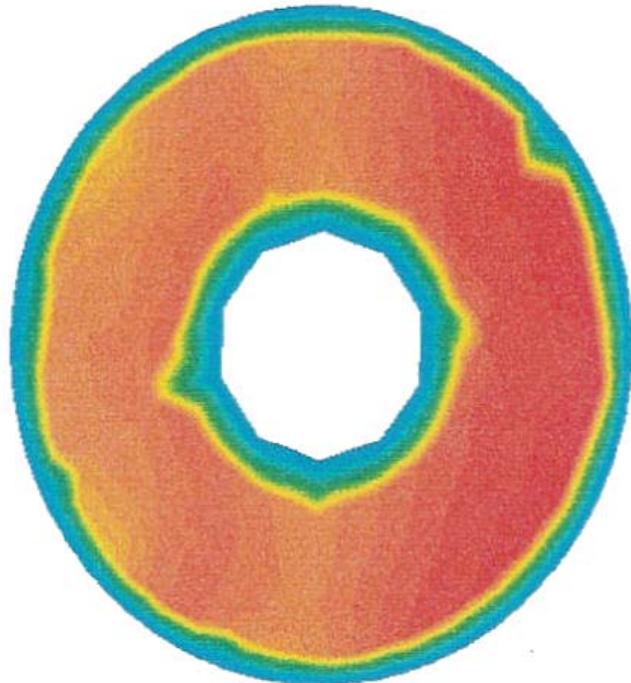
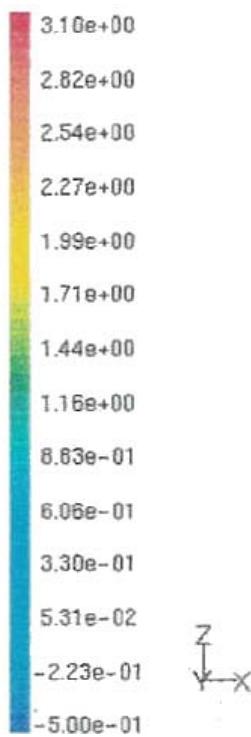
EXTRAITS DES RESULTATS DES CALCULS NUMERIQUES D'ECOULEMENT DANS LE COUDE D'ENTREE



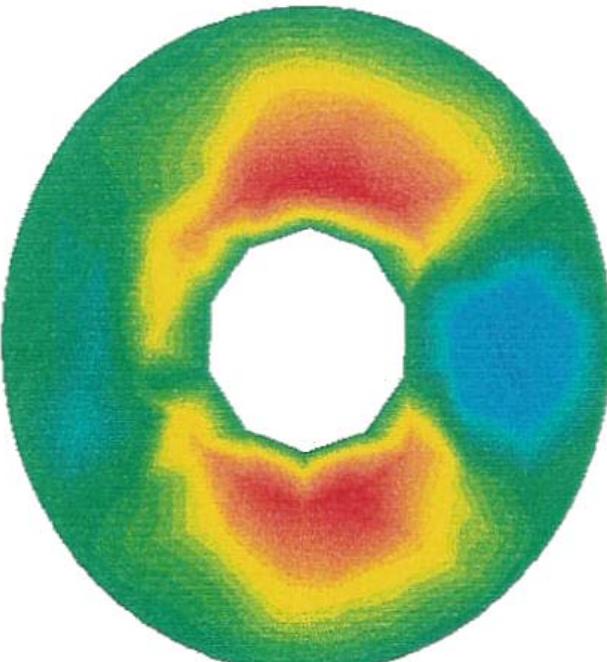
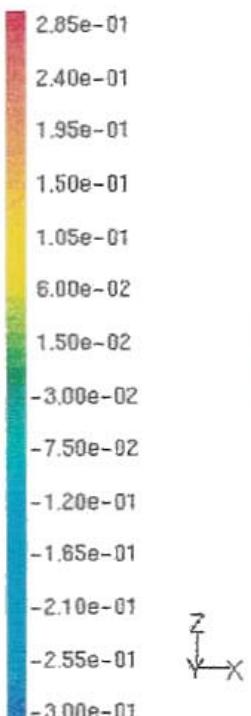
Maillage du coude d'entrée à section carrée utilisé pour le calcul d'écoulement.



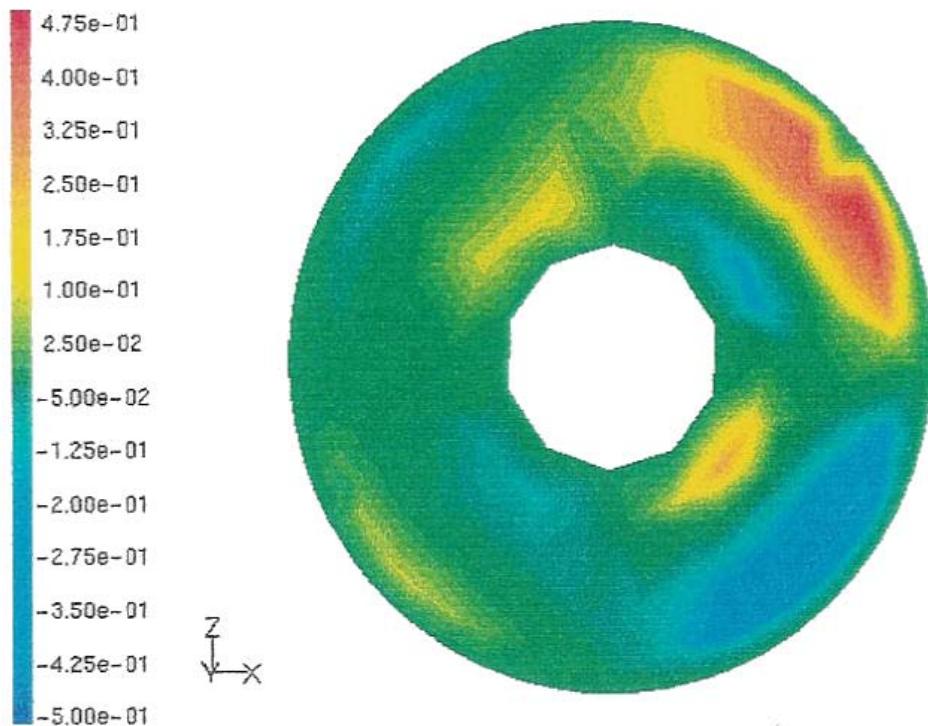
Représentation des vecteurs vitesses à la sortie du coude à section carrée (en m/s)



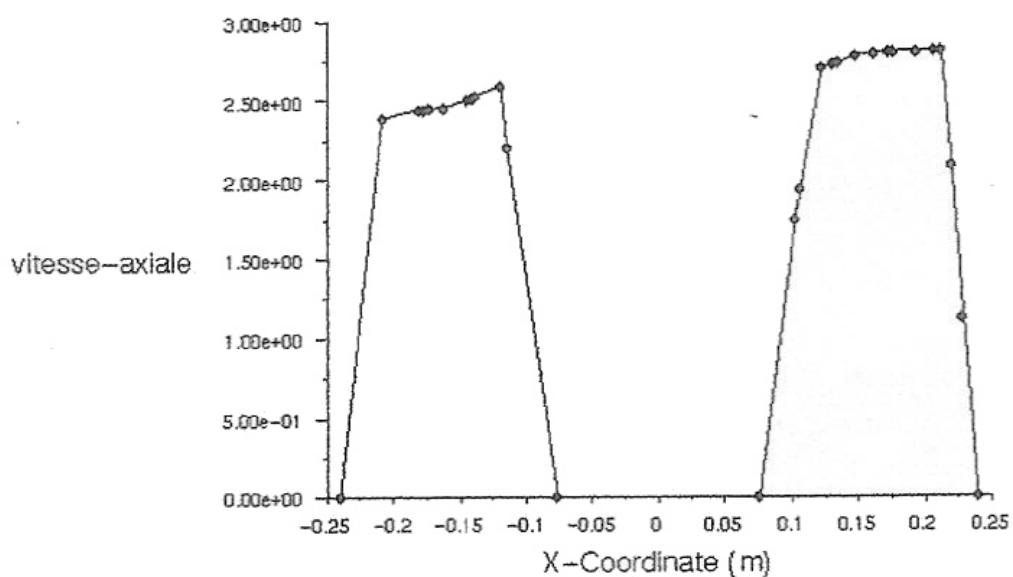
Représentation de vitesse axiale à la sortie du coude à section carrée (vitesse en m/s)



Représentation de vitesse radiale à la sortie du coude à section carrée (vitesse en m/s)



Représentation de vitesse tangentielle à la sortie du coude à section carrée (en m/s)

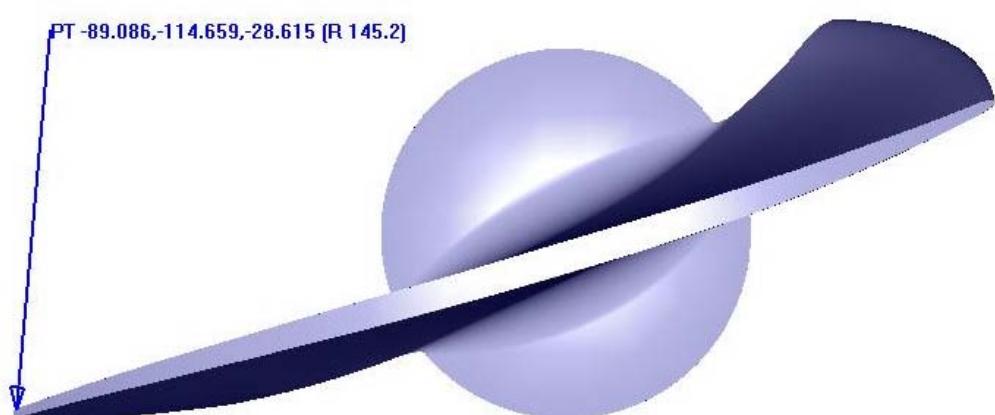
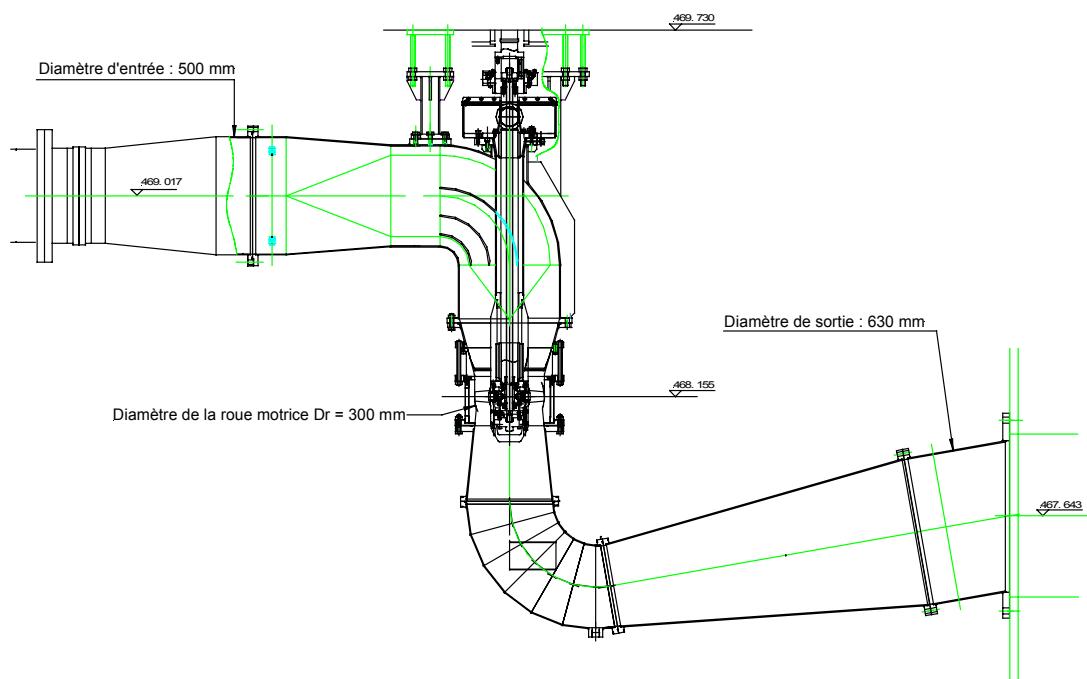


Répartition de vitesse axiale à la sortie du coude à section carrée selon l'axe X
(vitesse en m/s)

ANNEXE 2

EXTRAITS DE L'ETUDE CONSTRUCTIVE DE LA TURBINE D'ESSAI

MHyLab - Turbine d'essais axiale A-1
 Ensemble de montage sur la plate-forme d'essais



Tracé "surfacique" de la pale Kaplan à partir des données calculées de l'écoulement.

ANNEXE 3

PHOTOS DU MONTAGE DE LA TURBINE D'ESSAI



Montage de l'arbre de la turbine sur le dynamomètre

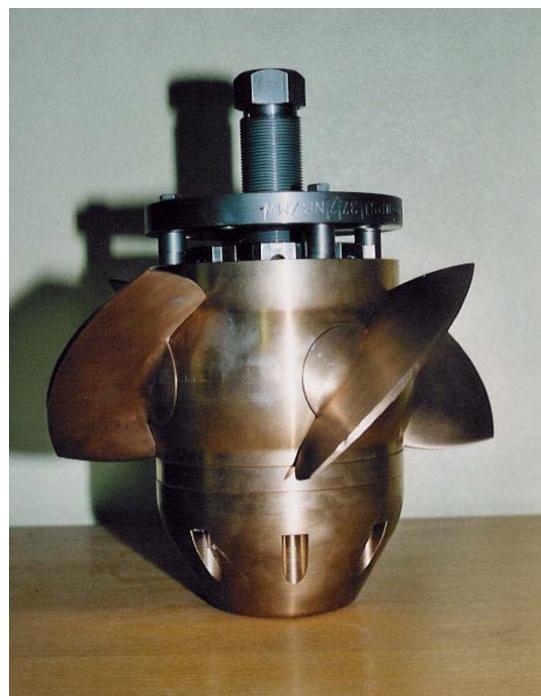
Montage du coude à ailettes





Montage du coude à ailettes

Roue Kaplan à 4 pales réglables



Montage de la roue



Montage du manteau de roue



Montage du manteau de roue

Montage du coude d'aspirateur





Montage de l'aspirateur

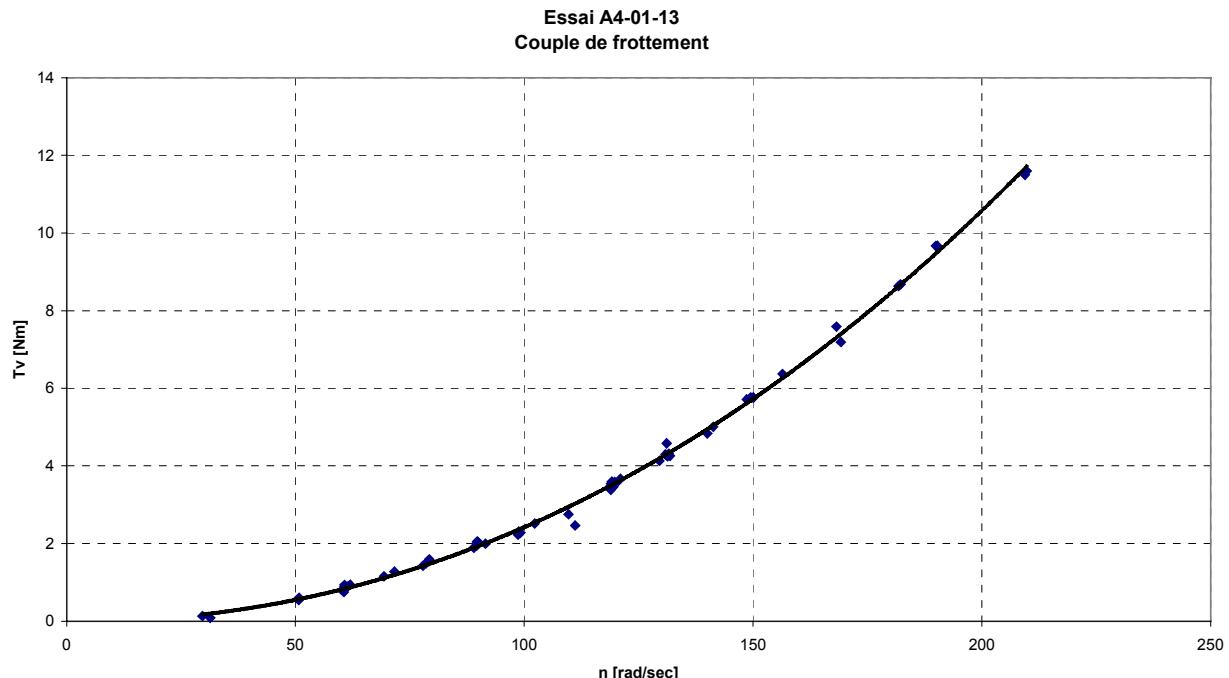
Fin du montage mécanique



ANNEXE 4

MESURE DU COUPLE DE FROTTEMENT DU PALIER A EAU

Le couple de frottement mesuré est important à haute vitesse. Ceci n'a pas de conséquences pour les machines industrielles qui fonctionneront avec des vitesses de rotation faibles (en général inférieures à 500 t/min ou 52 rad/s). La perte relative sera par conséquent inférieure à 1.2 %.



ANNEXE 5

SONDAGES D'ECOULEMENT

Localisation des sections de mesure



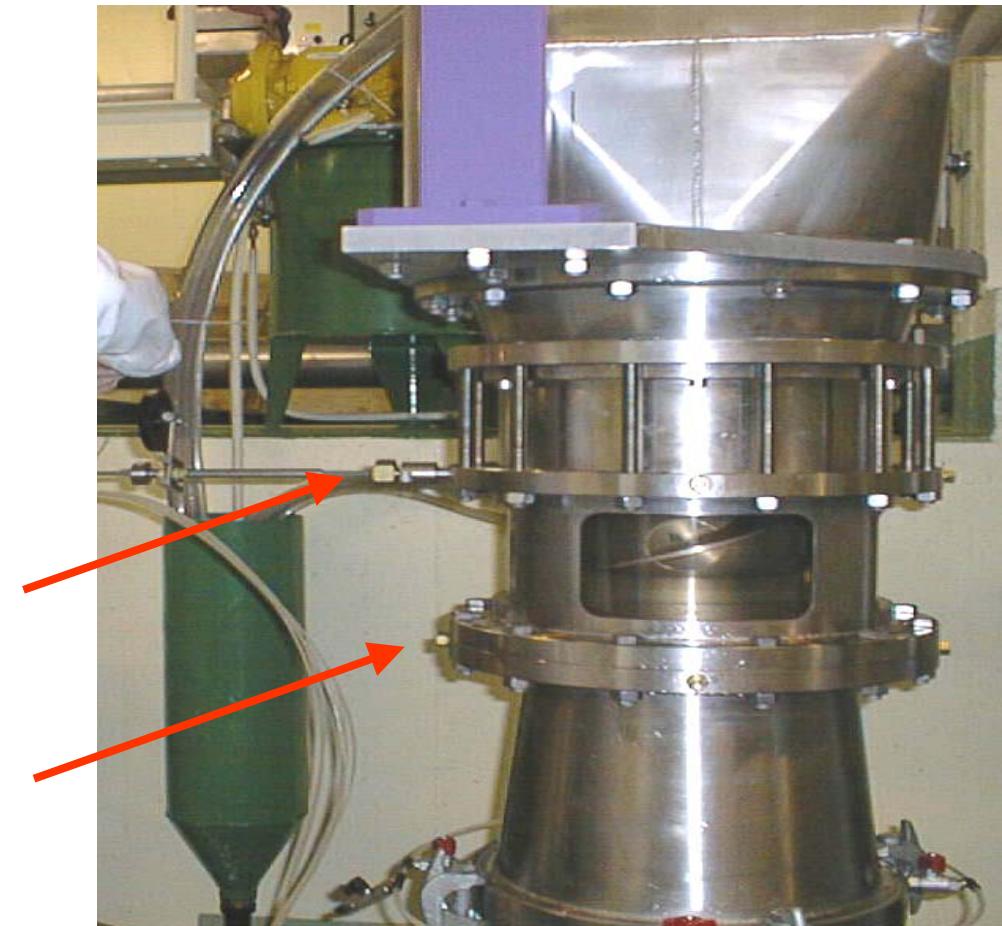
Section de mesure haute pression



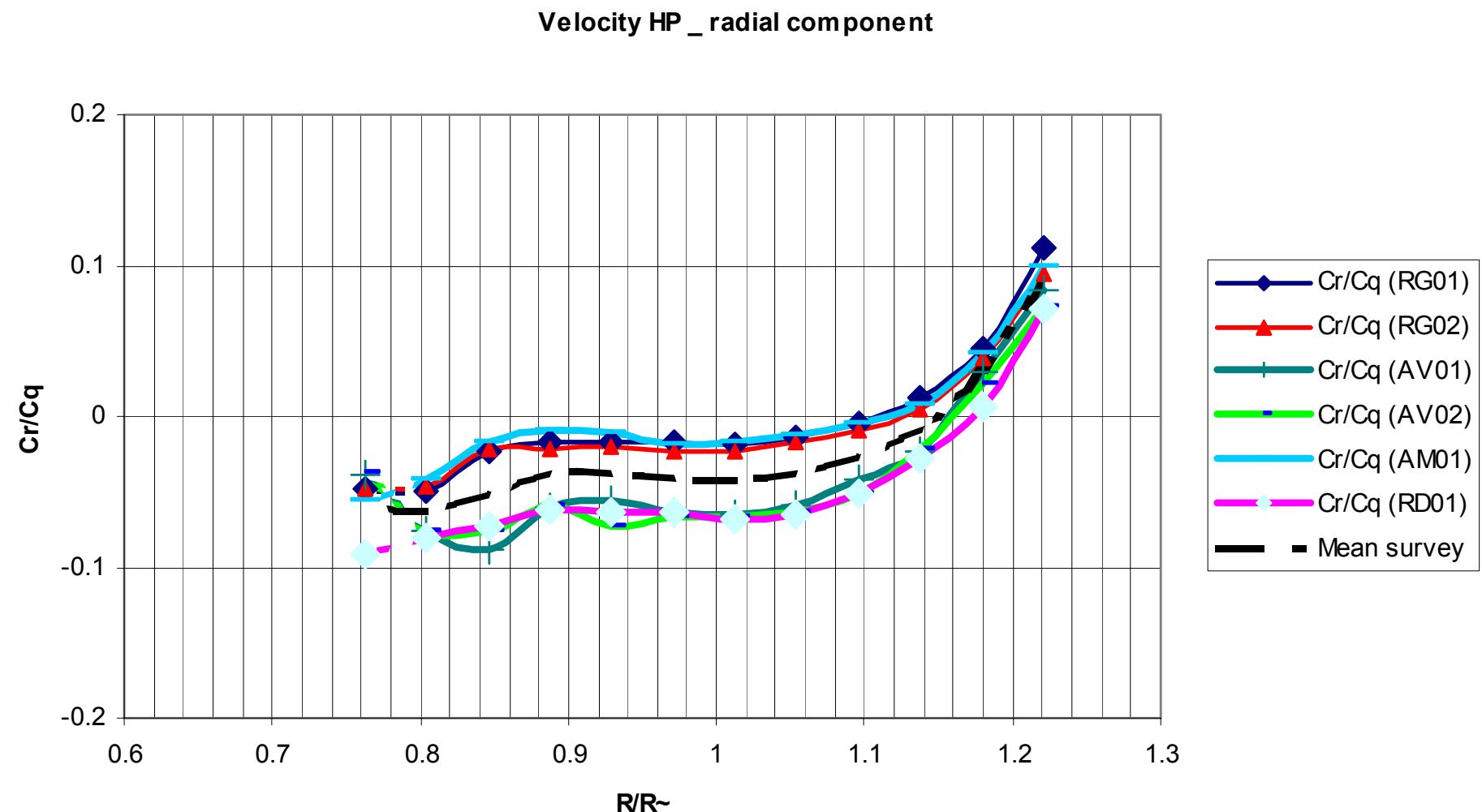
Section de mesure basse pression

Localisation des sections de sondage

D/R section
R/C section



Exemples de sondages d'écoulement en sortie de distributeur



Sondage de vitesse en aval de la roue (sortie du distributeur)

Ces résultats de sondage montrent bien que les répartitions de vitesse sont bonnes malgré la forme originale de la turbine comportant un coude d'entrée à section carrée, des ailettes de guidage et un arbre traversant.

C = Vitesse totale

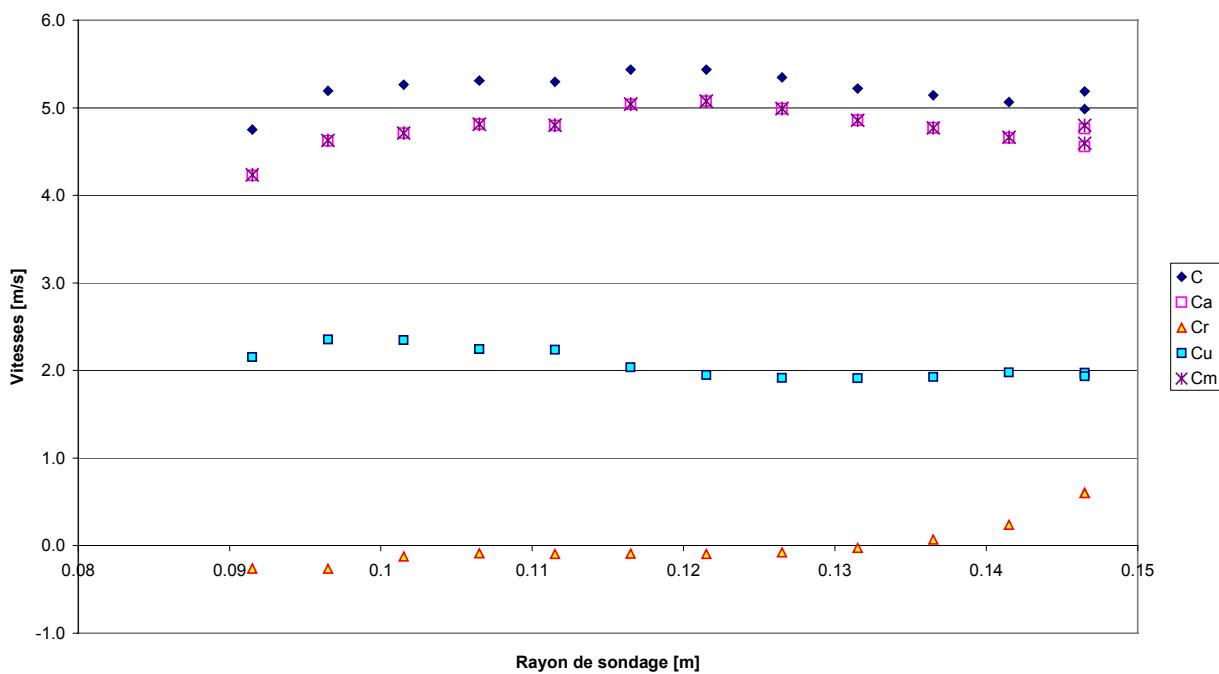
C_r = Vitesse radiale

C_a = Vitesse axiale

C_m = Vitesse méridienne

C_u = Vitesse tangentielle

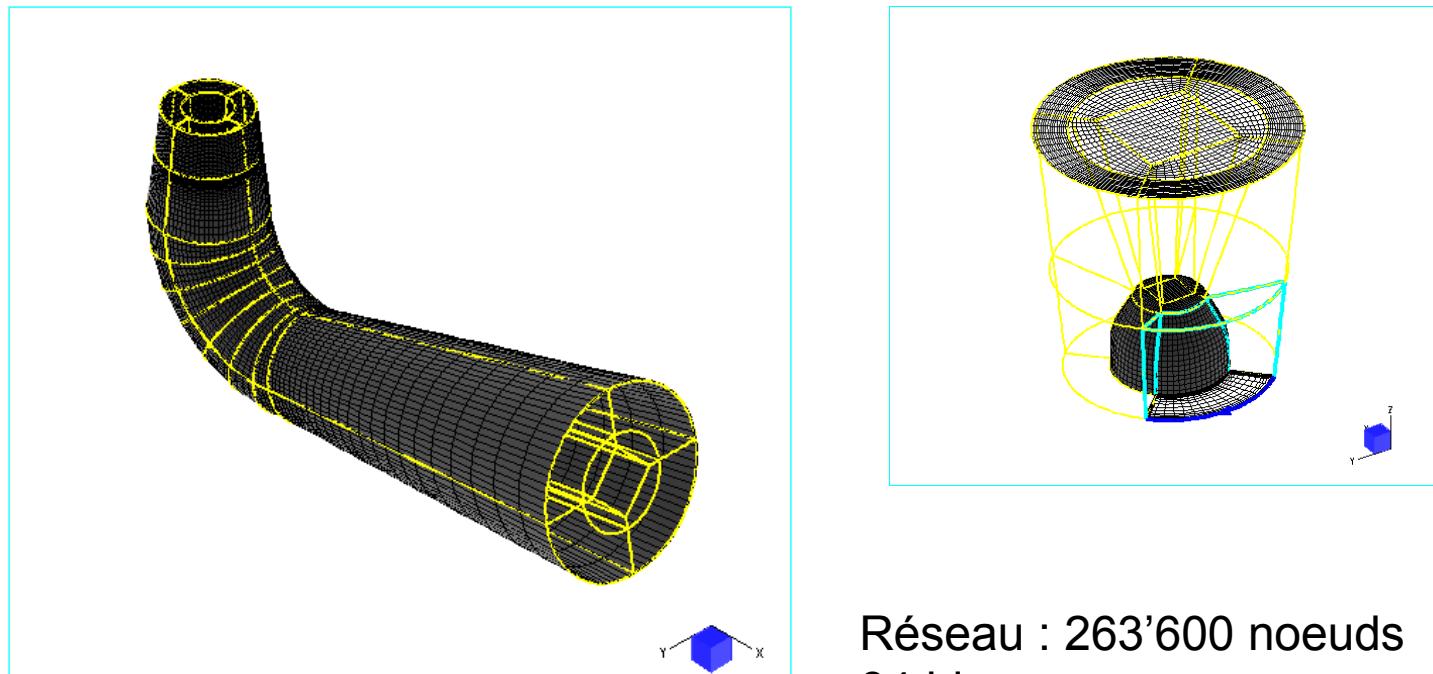
Sonde #: S022, Ref# SondHP-RG01, E=49.6 [J/kg], Q=0.2416 [m³/s], 16.05.01, RG=rive gauche



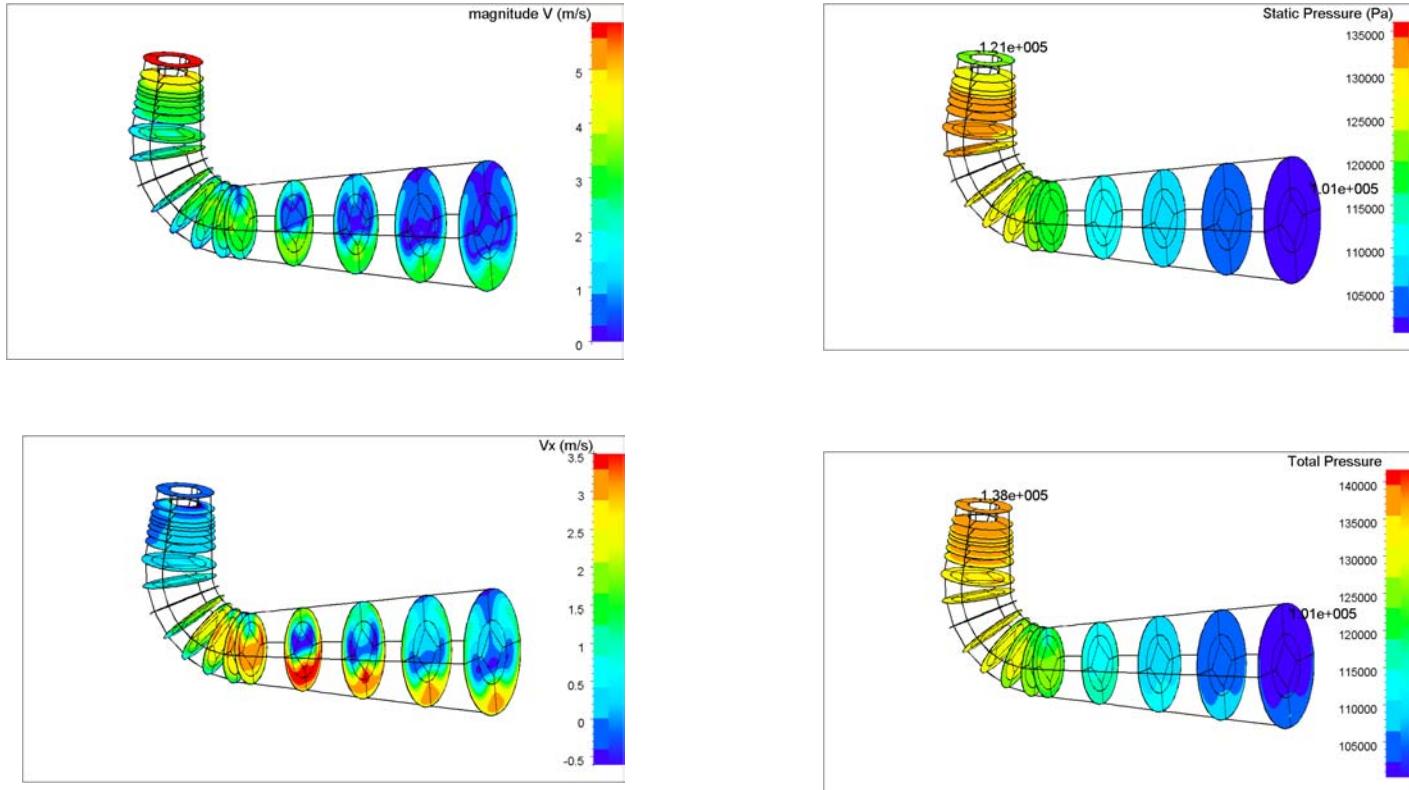
ANNEXE 6

EXEMPLES D'ANALYSES D'ECOULEMENTS

Maillage de l'aspirateur : configuration initiale

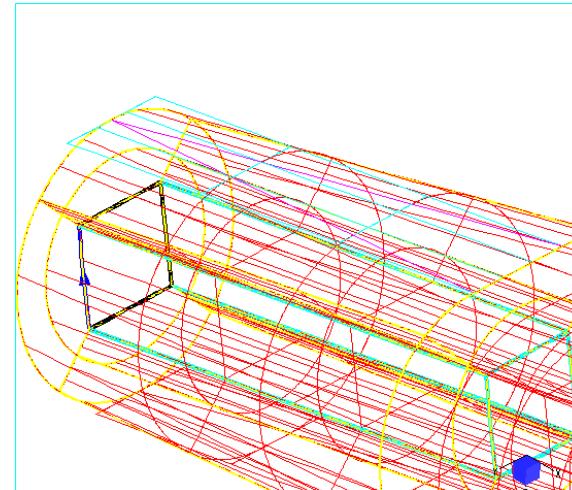
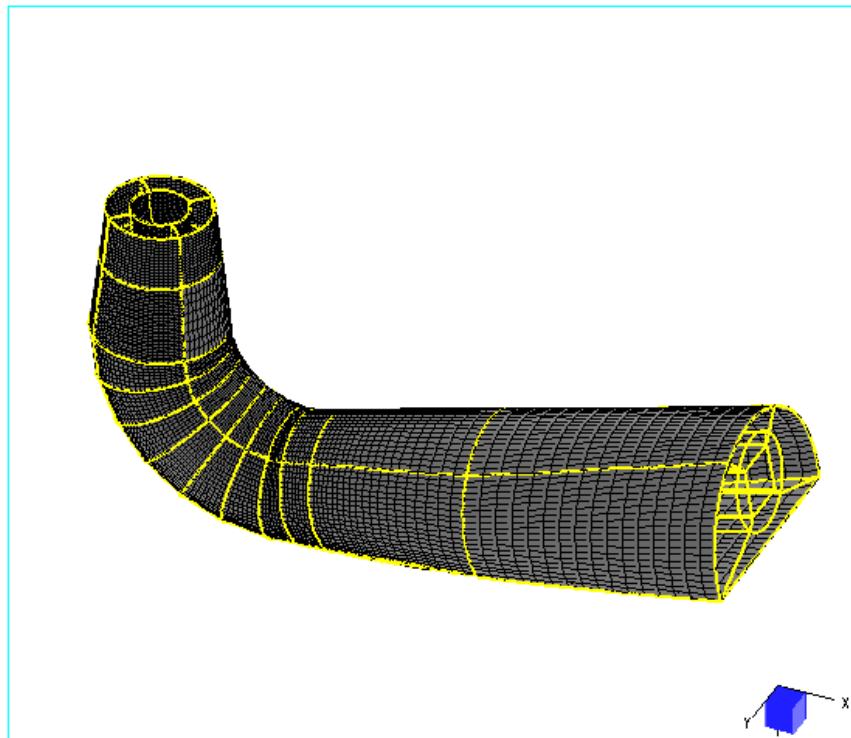


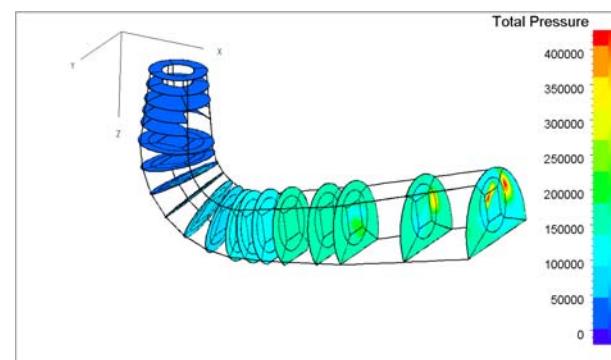
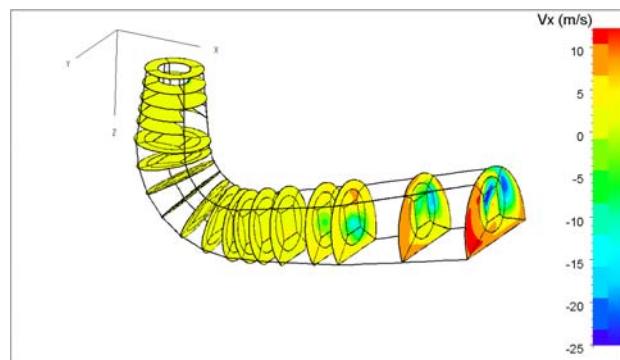
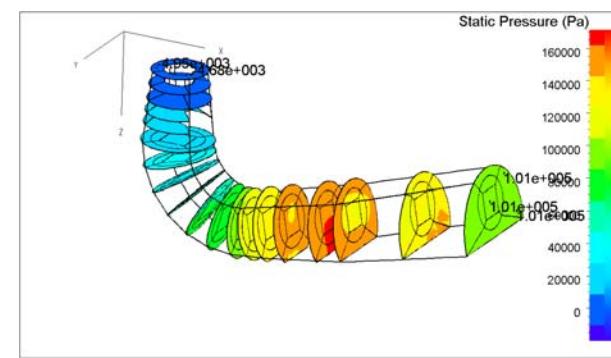
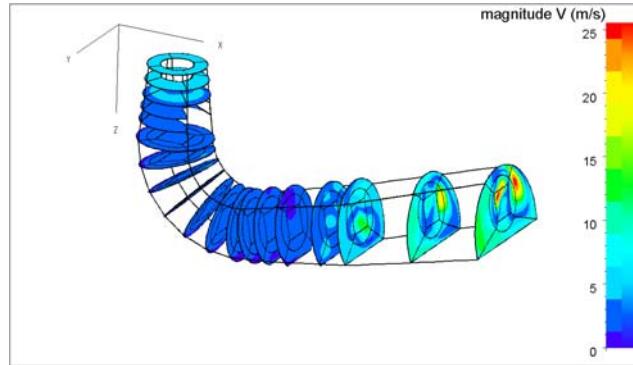
Réseau : 263'600 noeuds
84 blocs



Résultats de calcul pour la configuration initiale

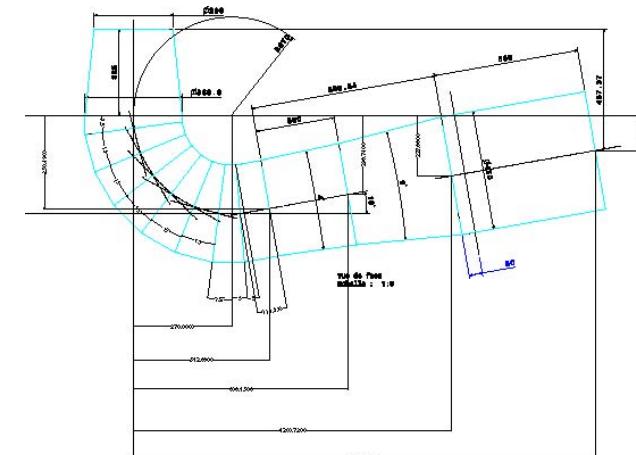
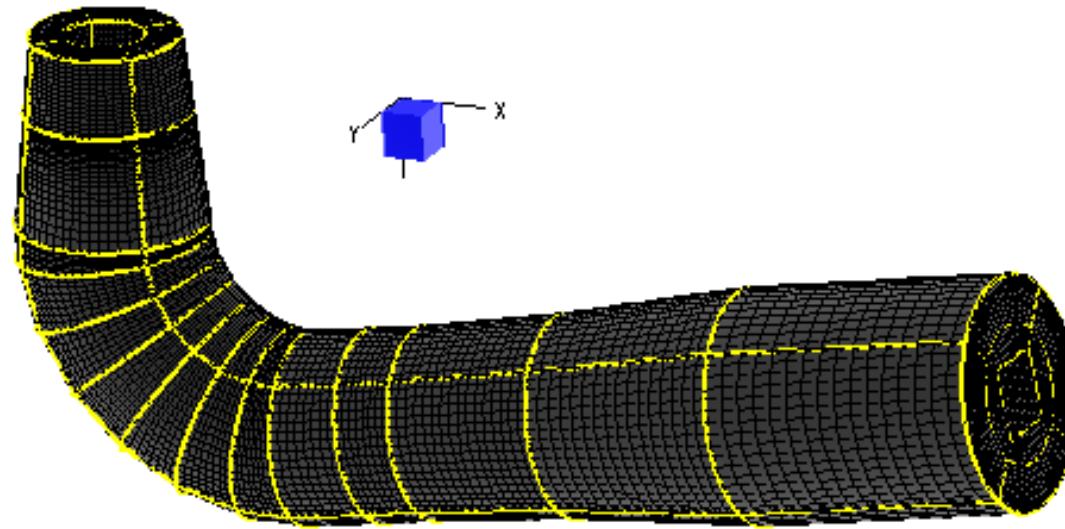
Maillage de l'aspirateur : variante 1

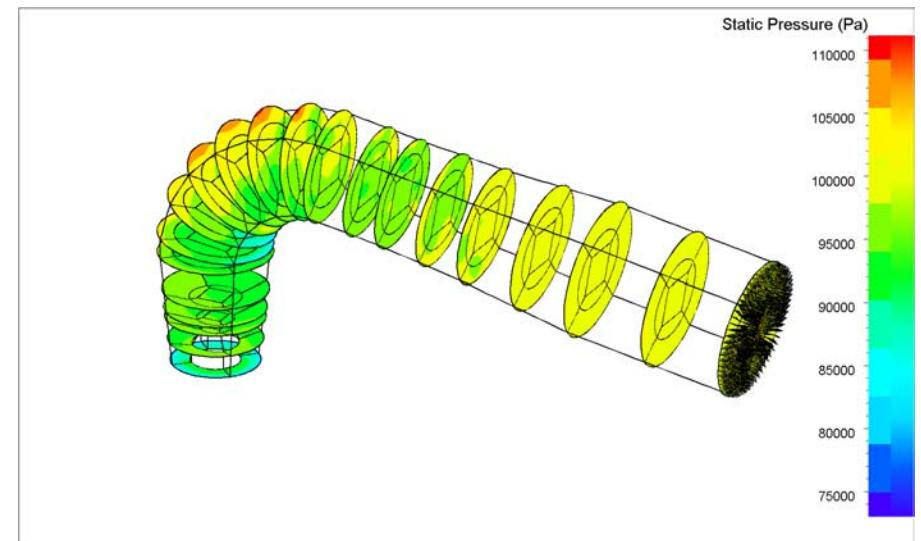
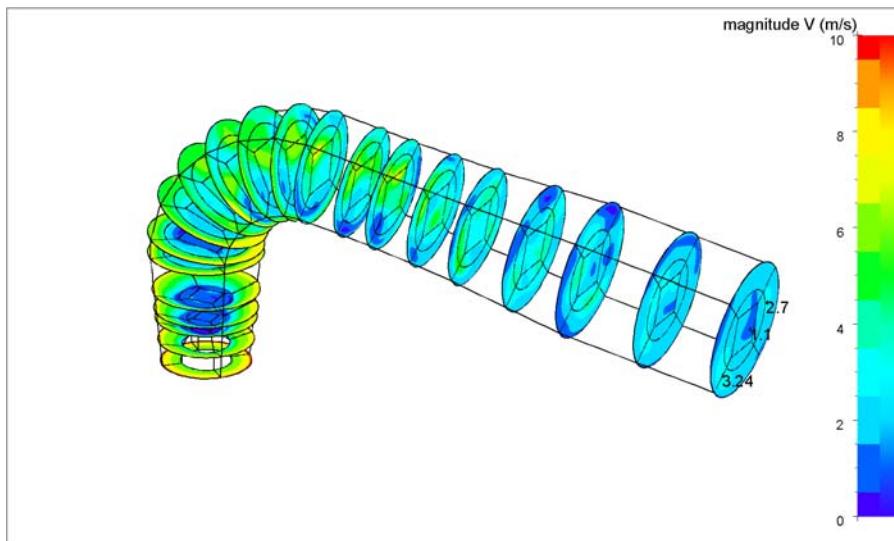




Résultats de calcul pour la variante 1 (calcul non stabilisé)

Maillage de l'aspirateur : variante 3

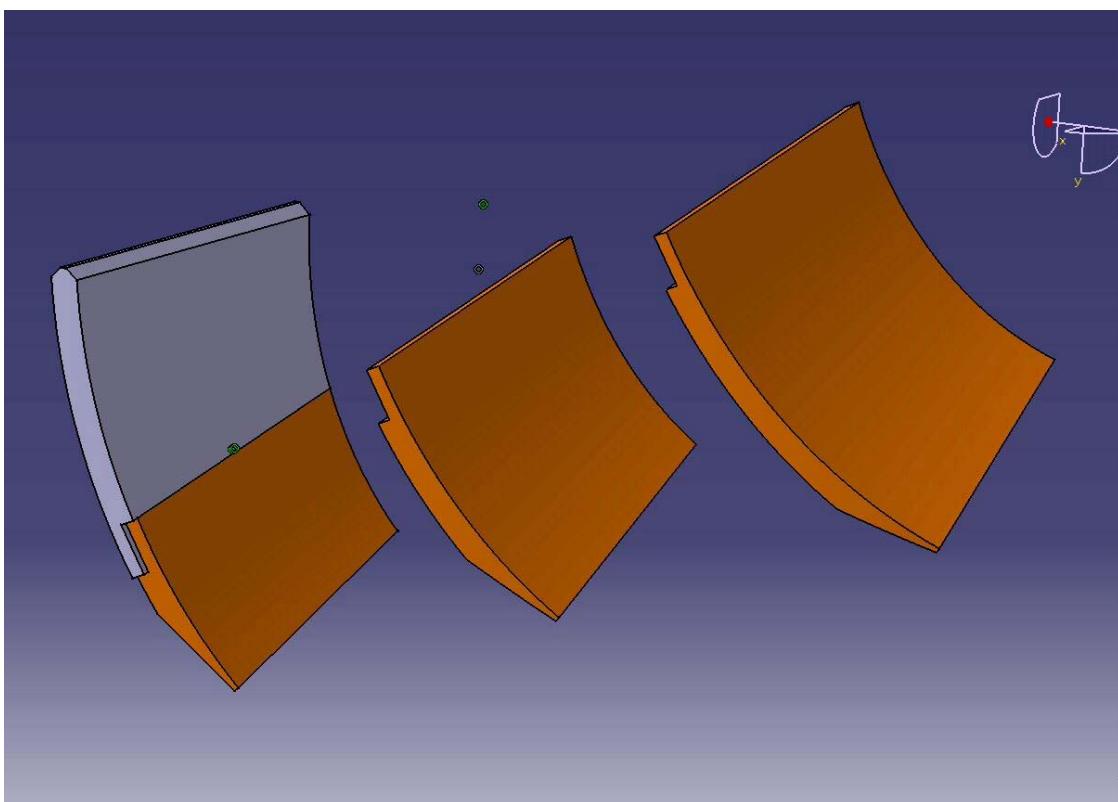




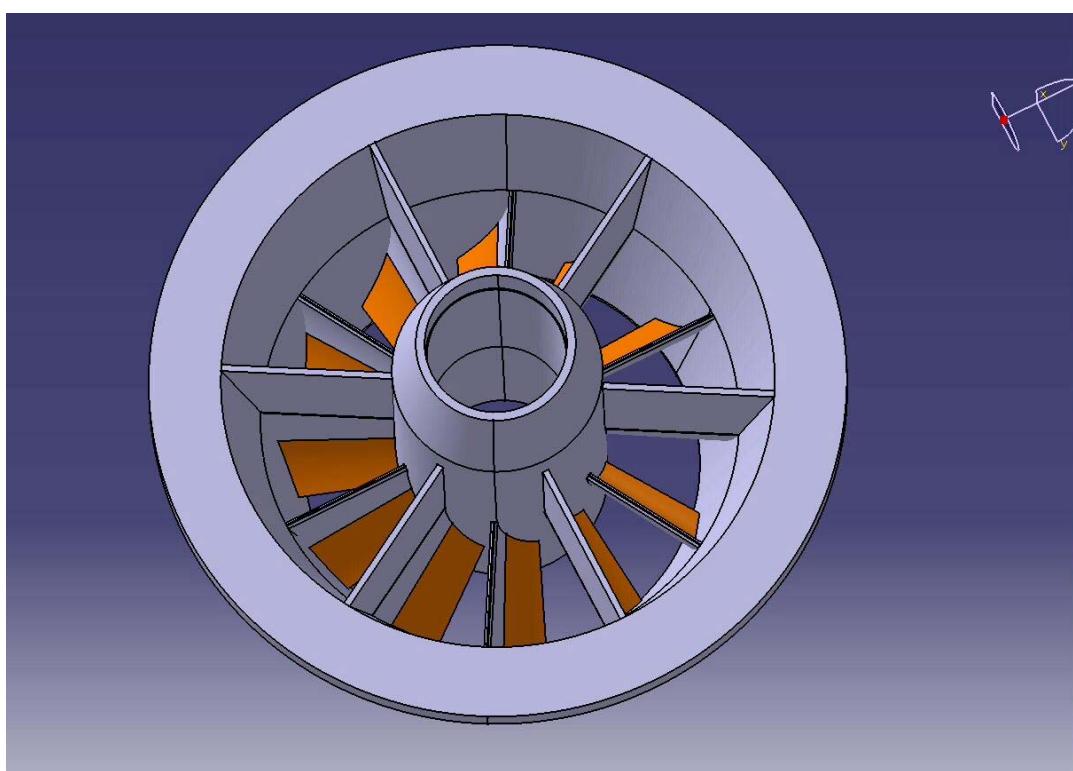
Résultats de calcul pour la variante 3

ANNEXE 7

VUES DU DISTRIBUTEUR A AUBES INTERCHANGEABLES



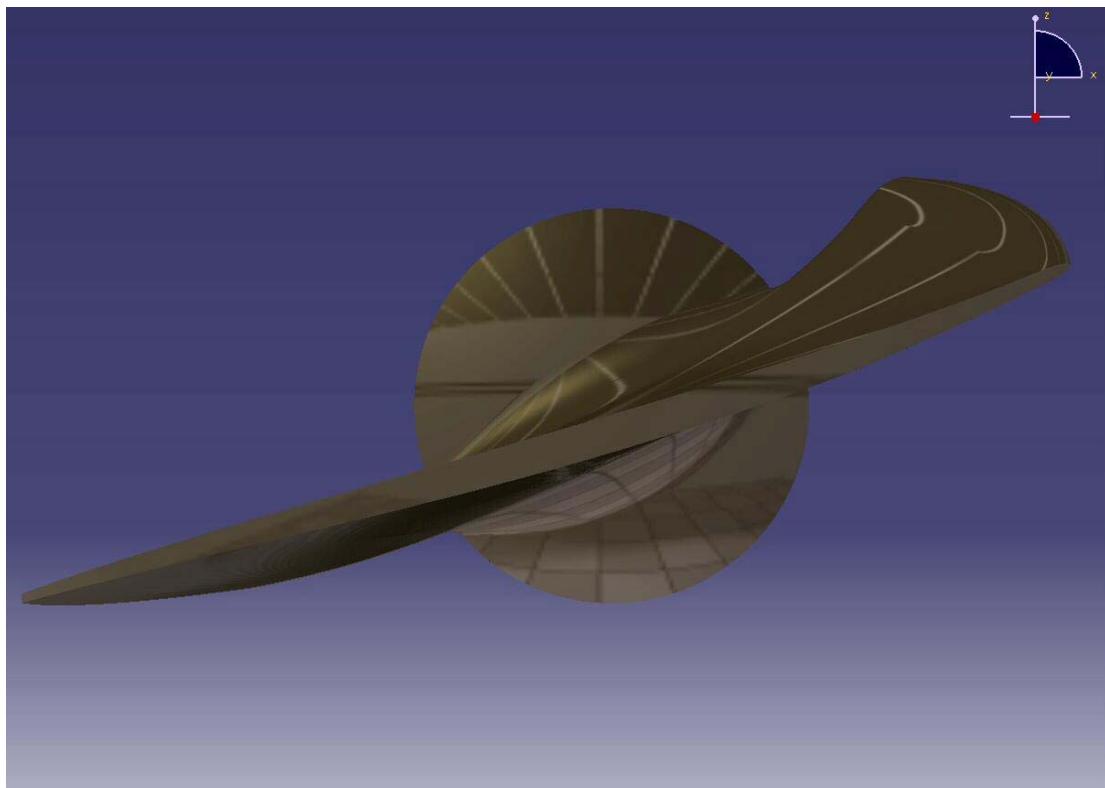
Vue des aubes interchangeables



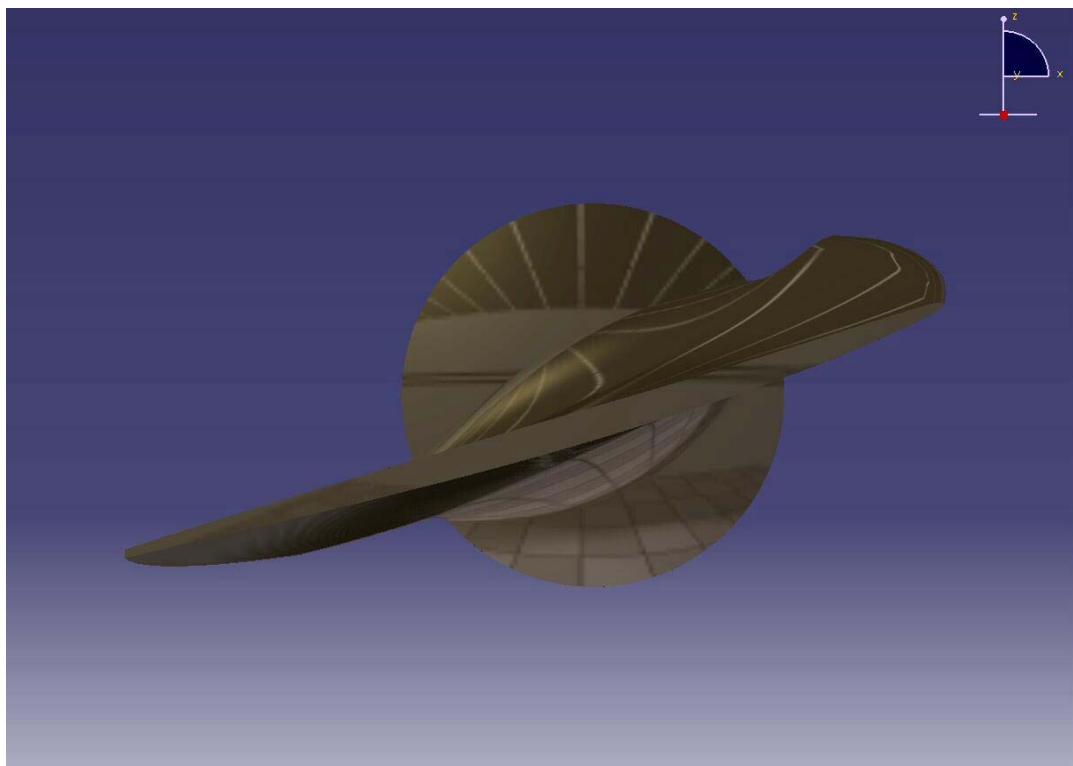
Vue du distributeur à aubes interchangeables (vue depuis l'amont)

ANNEXE 8

VUES DES AUBES POUR LA VERSION 8 PALES



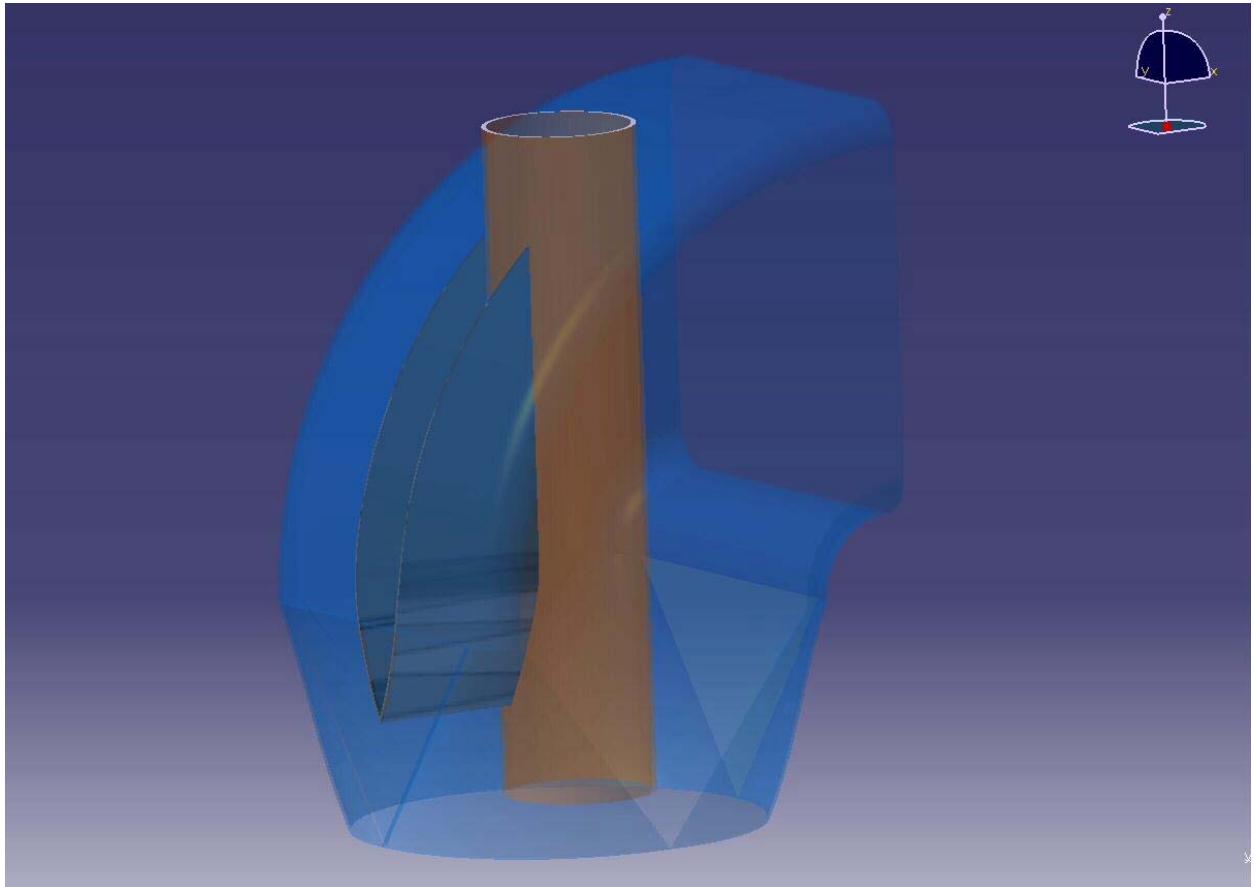
Pale type "longue"



Pale type "courte"

ANNEXE 9

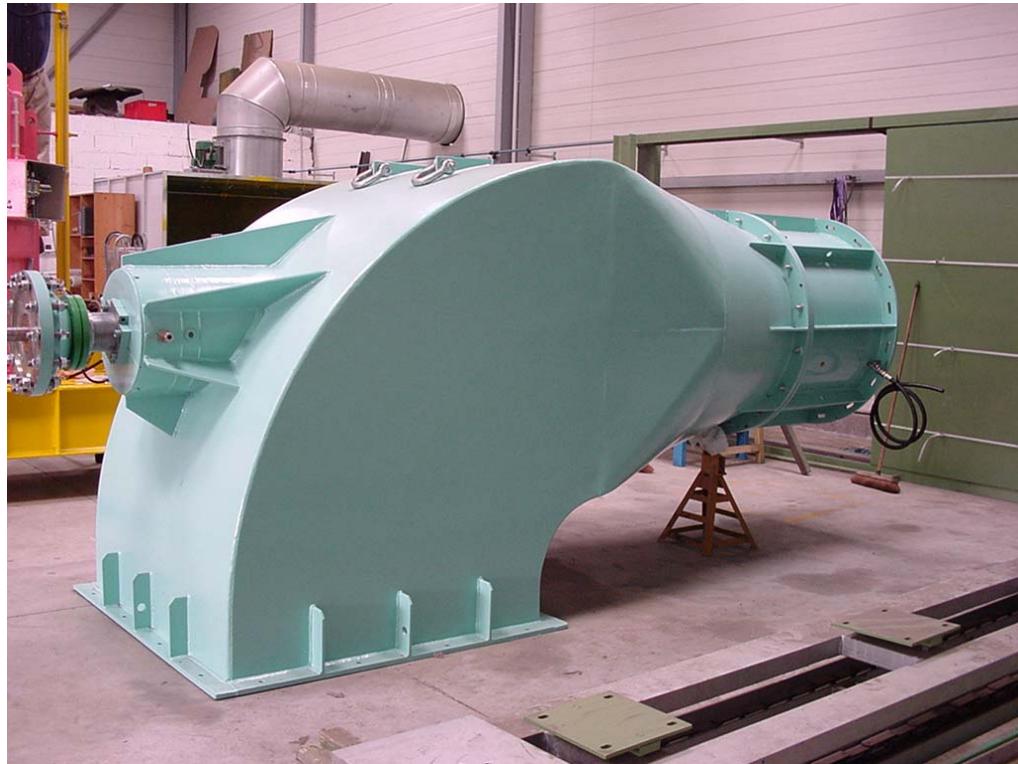
VUE DU GUIDEAU DU FOURREAU D'ARBRE



Vue 3D du guideau du fourreau d'arbre

ANNEXE 10

PHOTOS DE LA CONSTRUCTION DE LA TURBINE ET DU MONTAGE SUR SITE A LA CENTRALE DES FARETTES



Vue de la turbine des Farettes pré-montée en atelier



Vue de la turbine des Farettes pré-montée en atelier (vue depuis l'aval roue)



Alternateur en atelier.



Vue de l'alternateur de la mini-centrale des Farettes



Vue du montage sur site de la turbine des Farettes.





Vue de la mini centrale des Farettes depuis la rive Gauche



Vue de la mini centrale des Farettes depuis l'aval rive droite.