



PETITES CENTRALES HYDRAULIQUES

POMPE FONCTIONNANT EN TURBINE AVEC RÉGLAGE DU DÉBIT (PAT-FRANCIS)

4^{ÈME} PARTIE:

DIMENSIONNEMENT ET CONSTRUCTION DE LA BÂCHE SPIRALE

Rapport final – février 2007

Auteur:

Jean-Marc CHAPALLAZ

Ingénieur EPFL/SIA

Rue des Jaquettes

CH-1446 BAULMES

E-MAIL: jmceng@bluewin.ch

WEB: <http://mypage.bluewin.ch/jmchapallaz/>



Résumé:

Les pompes utilisées comme turbine trouvent leur application dans les microcentrales hydrauliques. Cependant, leur application est limitée car elles ne peuvent travailler qu'à débit fixe ou peu variable.

Dans cette étude, l'auteur propose de transformer une pompe utilisée comme turbine (PAT) en turbine Francis, dite PAT-Francis, en remplaçant la bache spirale de la pompe par une nouvelle bache équipée d'un distributeur à aubes réglables tel qu'utilisé sur les turbines Francis.

La publication comporte quatre parties:

1^{ère} partie: Présentation générale – Exemples d'utilisations de pompes en turbines – Caractéristiques et limites de fonctionnement d'une PAT - Concept proposé pour une PAT à débit réglable, ou PAT-Francis

2^{ème} partie: Présélection de la pompe inversée pour fonctionnement en turbine selon la méthode statistique développée par l'auteur - Détermination du point de fonctionnement optimum et des courbes caractéristiques.

3^{ème} partie: Concept et pré-dimensionnement du distributeur à pales réglables adapté sur une pompe de série

4^{ème} partie: Pré-dimensionnement de la nouvelle bache spirale à adapter sur la PAT-Francis et propositions pour une construction simplifiée.

L'étude est illustrée par les exemples des pompes fonctionnant comme turbines à débit fixe dans deux microcentrales hydrauliques réalisées sous la direction de l'auteur.

Abstract:

Standard pumps are used as turbines in micro-hydropower plants. However their application is limited since they can only operate at fixed or slightly variable flow.

In his study, the author proposes to transform a pump used as turbine (PAT) in a turbine equipped with variable guide vanes, similar to a Francis turbine. This machine is named PAT-Francis. It can be realised by taking away the existing spiral casing of a standard pump and replacing it through a guide vane system with a new spiral.

The publication is divided into 4 parts:

1st part: General presentation – Examples of applications of pumps as turbines – Characteristic curves and operation limits of a PAT – Proposed concept for a PAT with variable flow, or PAT-Francis

2nd part: Preliminary selection of a pump to be used as a turbine, according to a statistical method developed by the author – Determination of the optimal operating point and characteristic curves.

3rd part: Concept and preliminary dimensioning of a variable guide vane system for a standard pump used as a turbine

4th part: General lay-out of a new spiral casing to be adapted on the PAT-Francis and proposals for a simplified construction.

The study is illustrated with the examples of two pumps used as fixed flow turbines in a micro-hydropower plant realized under the direction of the author

Date: février 2007

Soutenu par l'Office fédéral de l'énergie OFEN

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Adresse postale: CH-3003 Berne

Tél. +41 31 322 56 11, fax +41 31 323 25 00 www.bfe.admin.ch

Responsable OFEN: bruno.guggisberg@bfe.admin.ch

Numéro de projet: 101867

| Table des matières : | Page |
|----------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| 1. Introduction et méthodologie | 4 |
| 2. Paramètres géométriques et vitesses | 5 |
| 3. Détermination des vitesses à l'entrée du distributeur au point optimum | 7 |
| 4. Diamètre tubulure d'entrée de la bache spirale | 7 |
| 5. Exemples de calcul | 8 |
| 6. Propositions pour la construction du distributeur et de la bache | 9 |



1. Introduction et méthodologie

La conception d'une PAT à distributeur réglable (nommés ci-après PAT-Francis) passe par les étapes suivantes:

Détermination des données de fonctionnement:

La caractéristique rendement-débit d'une PAT-Francis peut être comparée à celle d'une turbine Francis de vitesse spécifique lente.

Faute de données expérimentales, nous admettrons par analogie:

- Le point de fonctionnement à rendement maximum se situe à 85-90% du débit maximum.
- La limite inférieure du fonctionnement avec un rendement satisfaisant se situe à env. 40% du débit maximum.

Le débit maximum Q_{max} et la chute correspondante H_{max} de la turbine seront établis sur la base de la courbe des débits classés.

Les points de fonctionnement deviennent donc:

Débit maximum en exploitation: Q_{max}

Débit rendement maximum: $Q_t = 0.87 \times Q_{max}$ avec la chute correspondante H_t

Débit minimum en exploitation: $Q_{min} = \text{env. } 0.4 Q_{max}$

Sélection de la pompe transformée en PAT-Francis:

Le débit Q_t , avec la chute nette H_t correspondante serviront de base pour la sélection de la pompe destinée à être transformée en PAT-Francis selon l'approche simplifiée décrite dans le rapport précédent (2^{ème} partie, Sélection..).

Dimensionnement du distributeur:

Le distributeur sera dimensionné géométriquement sur la base du diamètre extérieur de la roue de la pompe transformée en PAT-Francis. Cette présentation fait l'objet de ce rapport (3^{ème} partie, Dimensionnement....).

Dimensionnement de la bêche spirale:

La bêche spirale sera dimensionnée en fonction du diamètre extérieur du distributeur en position "ouverture maximum".

Ce rapport concerne le dimensionnement et la construction de la bêche spirale de la pompe qui sera transformée en PAT-Francis.

2. Paramètres géométriques et vitesses

Paramètres géométriques:

Pour le dimensionnement de la bêche spirale, nous avons besoin de définir l'angle et la vitesse d'entrée de l'eau dans le distributeur au point de meilleur rendement.

Ce paramètre déterminera la section d'entrée minimale de la tubulure amont de la turbine (DN de la bride de raccordement à la conduite forcée).

Les paramètres géométriques utiles sont les suivants:

A l'entrée de la roue:

Diamètre extérieur D_1 Rayon extérieur R_1 Rayon extérieur majoré R_{1+}

Hauteur aubage B_1 Angle aubage β_1

Pour le distributeur:

- Nombre de pales: z_d
- Pas angulaire entre les pales $2 \times \delta$
- Longueur des pales $2L$ (L = demi-longueur)
- Rayon du centre de rotation des pales R_0 . Ce point est admis au milieu de la longueur de la pale pour le pré-dimensionnement.
- Rayon extérieur des pales en position ouverte R_a = limite extérieure du distributeur
- Hauteur de l'aubage B_a admise égale à celle de la roue B_1

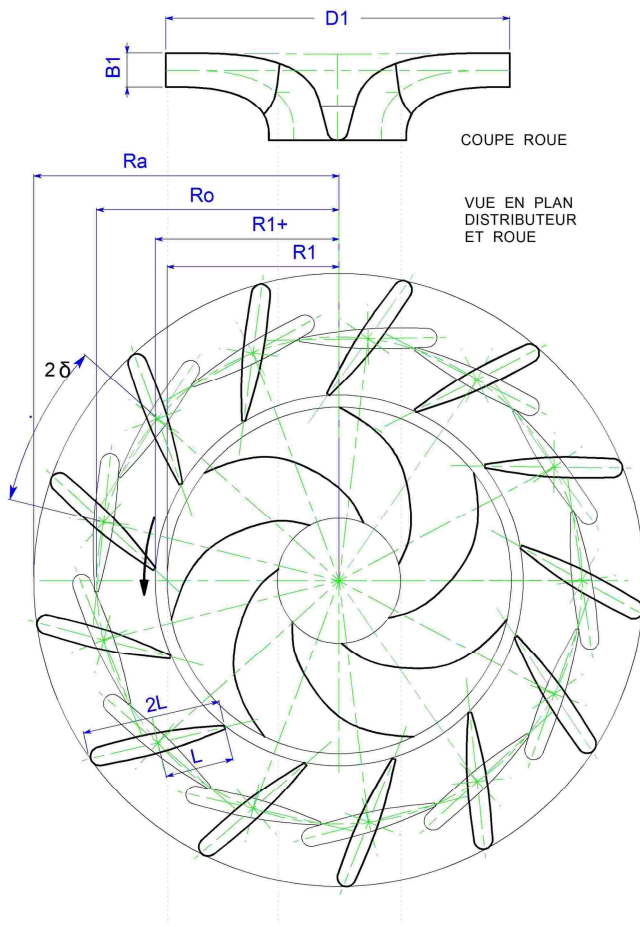


Figure 2.1.: Paramètres géométriques de la roue et du distributeur



Vitesses à l'entrée et à la sortie du distributeur:

La figure 2.2. présente les vitesses à l'entrée et à la sortie du distributeur.

Les vitesses sont définies comme suit:

Vitesse absolue C

Vitesse périphérique absolue C_u : composante de C tangente au cercle

Vitesse méridienne C_m : composante radiale de C

Angle du vecteur vitesse absolue C avec tangente au cercle: α

L'indice (a) correspond à l'entrée amont du distributeur, l'indice (1) à la sortie du distributeur (entrée roue). Nous avons donc:

| | | | | | |
|--------------|-----------|-------|----------|----------|-------------------|
| à l'entrée: | vitesses: | C_a | C_{ua} | C_{ma} | angle: α_a |
| à la sortie: | vitesses: | C_1 | C_{u1} | C_{m1} | angle: α_1 |

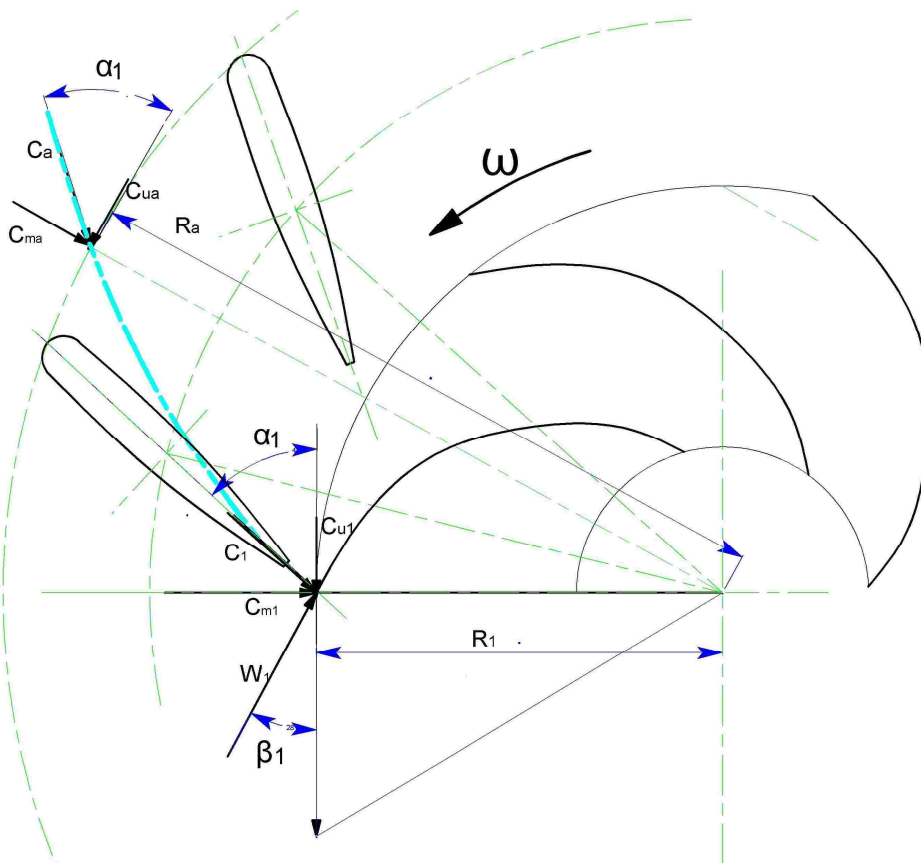


Figure 2.2.: Vitesses à l'entrée et à la sortie du distributeur

3. Détermination des vitesses à l'entrée du distributeur au point optimum

Vitesse méridienne C_{ma}

Avec Q = débit optimum et $B_a = B_1$

$$Q = 2 \times \pi \times R_a \times B_a \times C_{ma} = 2 \times \pi \times R_1 \times B_1 \times C_{m1}$$

$$C_{ma} = C_{m1} \times R_1 / R_a$$

Vitesse périphérique C_{ua}

La vitesse périphérique est régie par la loi:

$$R_1 \times C_{u1} = R_a \times C_{ua}$$

$$C_{ua} = C_{u1} \times R_1 / R_a$$

Vitesse absolue C_a

$$C_a = C_1 \times R_1 / R_a$$

Angles:

$$\alpha_1 = \alpha_a$$

4. Diamètre tubulure d'entrée de la bêche spirale

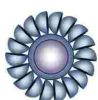
En première approximation, nous admettons:

Vitesse d'entrée dans la bêche inférieure à C_a

Pour le diamètre DN, choisir le diamètre standard supérieur au diamètre calculé à l'aide de Q et C_a

$$Q = C_a \times \pi \times (D/2)^2$$

$$DN > 2 \times (Q / (\pi C_a))^{1/2}$$



5. Exemples de calcul

Nous reprenons les exemples des microcentrales La Rise et Hautepierre présentés en 2^{ème} et 3^{ème} partie de cette étude:

| Pompe – turbine de: | La Rise | Hautepierre | | |
|------------------------------------------|-----------|-------------|-----|----------|
| Données turbine: | | | | |
| H (m) | 17.0 | 52.5 | | |
| Q (m ³ /s) | 0.070 | 0.055 | | |
| n (t/min) | 1510 | 1510 | | |
| Données roue: | | | | |
| D ₁ (mm) | 210 | 314 | | |
| B ₁ (mm) | 31 | 11 | | |
| Vitesses spécifiques: | | | | |
| n _{qt} | 48 | 18 | | |
| n _{qp} = n _{qt} / 0.89 | 54 | 20 | | |
| Vitesses et angles: | | | | |
| U ₁ (m/s) | 16.60 | 24.8 | | |
| C _{u1} (m/s) | 8.25 | 16.8 | | |
| C _{m1} (m/s) | 3.32 | 4.88 | | |
| C ₁ (m/s) | 8.89 | 17.5 | | |
| α ₁ (deg) | 21.9 | 16.2 | | |
| Géométrie: | | | | |
| Nbre pales distributeur z _d : | 10 | 10 | | |
| Rayon ext. R _a (mm) | 188.8 | 244.9 | | |
| R _a / R ₁ | 1.8 | 1.56 | | |
| C _a (m/s) | 4.93 | 10.4 | | |
| Section entrée bêche spirale: | | | | |
| D entrée bêche, calcul (mm) | 134 | variante | 82 | variante |
| DN min. proposé (mm) | 150 | (200) | 100 | (125) |
| Vitesse entrée pour DN (m/s) | 4.00 | (2.23) | 7.0 | (4.5) |

Remarque:

Sous "variante" nous proposons une valeur DN supérieure qui aura pour conséquence un abaissement de la vitesse d'entrée, donc une diminution des pertes.

Ceci permettra d'adopter, pour la bêche, une construction simplifiée cylindrique. Cette valeur supérieure de DN pourrait, par exemple, être proposée si ce DN correspond à celui de l'arrivée de la conduite forcée.

Voir détails sous le chapitre: **Propositions pour la construction....**

6. Propositions pour la construction du distributeur et de la bêche

Il est possible de calquer la construction du distributeur et de la bêche spirale d'une PAT-Francis sur celle des turbines Francis traditionnelles.

Cependant, pour le domaine des petites puissances envisagées pour ce type de machines (100kW ou moins, diamètre des roues inférieures/égales à 400mm), cette construction traditionnelle peut s'avérer coûteuse et diminuer la marge d'économies potentielles par rapport à une turbine Francis.

L'auteur a donc examiné des solutions constructives simplifiées, en évitant, en particulier, la construction de la bêche spirale en "escargot" en segments coniques.

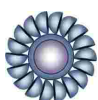
Deux variantes sont ressorties de ces réflexions:

- **Variante 1:** Bêche spirale "escargot", mais cylindrique, en plaques épaisses et tôle roulée. La forme et les sections de ce type de bêche se calculent de la même manière que les bêches spirales traditionnelles, soit avec l'hypothèse de la vitesse constante (réduction de la section en proportion avec la diminution de débit sur la circonférence), soit avec l'hypothèse de pertes de charge constantes et vitesse variable sur la circonférence.
- **Variante 2:** Bêche spirale cylindrique simplifiée, construite avec tubes et plaques. Cette option est conseillée pour des vitesses d'écoulement inférieures à celles de la variante "escargot". (DN tubulure d'entrée variante 2 supérieure à DN tubulure d'entrée variante 1)

Aubes: pour le distributeur, les aubes sont fixées en porte-à-faux en bout d'axe.

Les constructions proposées s'adaptent directement sur la pompe en lieu et place de la spirale existante.

Des dessins d'étude de ces solutions sont présentés sur les figures 6.1. 6.2. 6.3. ci-après:



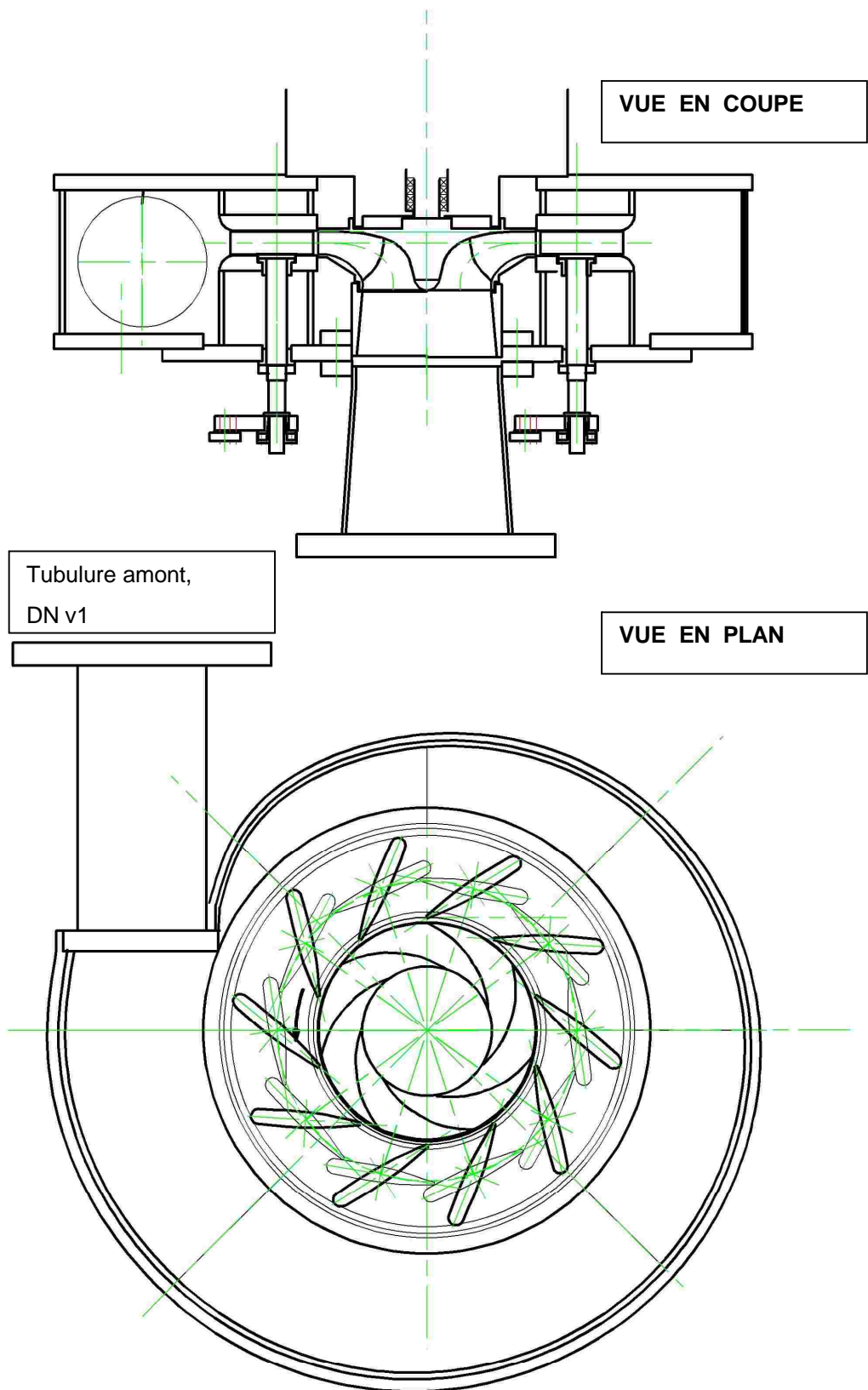


Figure 6.1.: Variante 1 - PAT-Francis avec bache spirale cylindrique type "escargot"

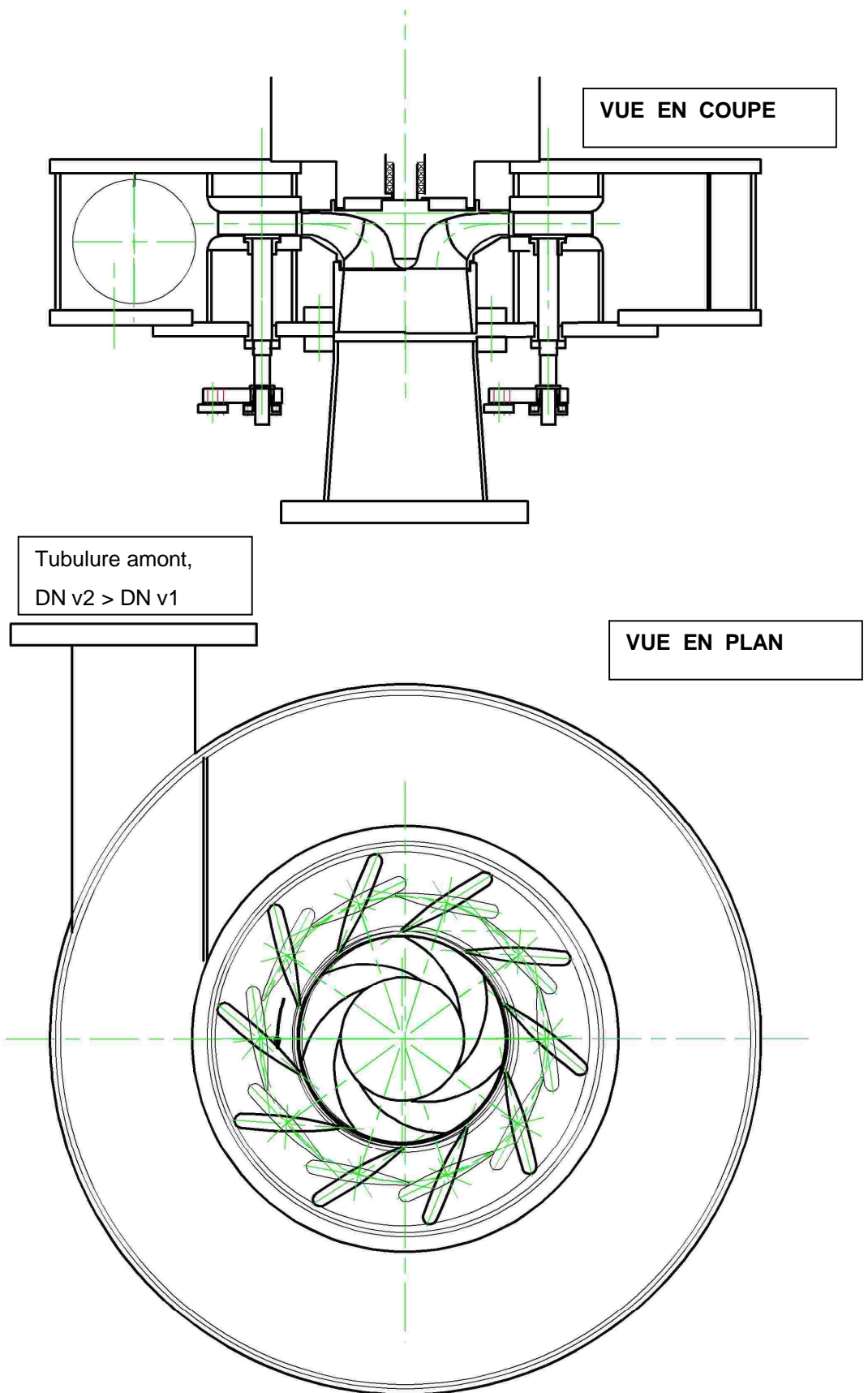


Figure 6.2.: Variante 2 - PAT-Francis avec bâche spirale cylindrique simplifiée



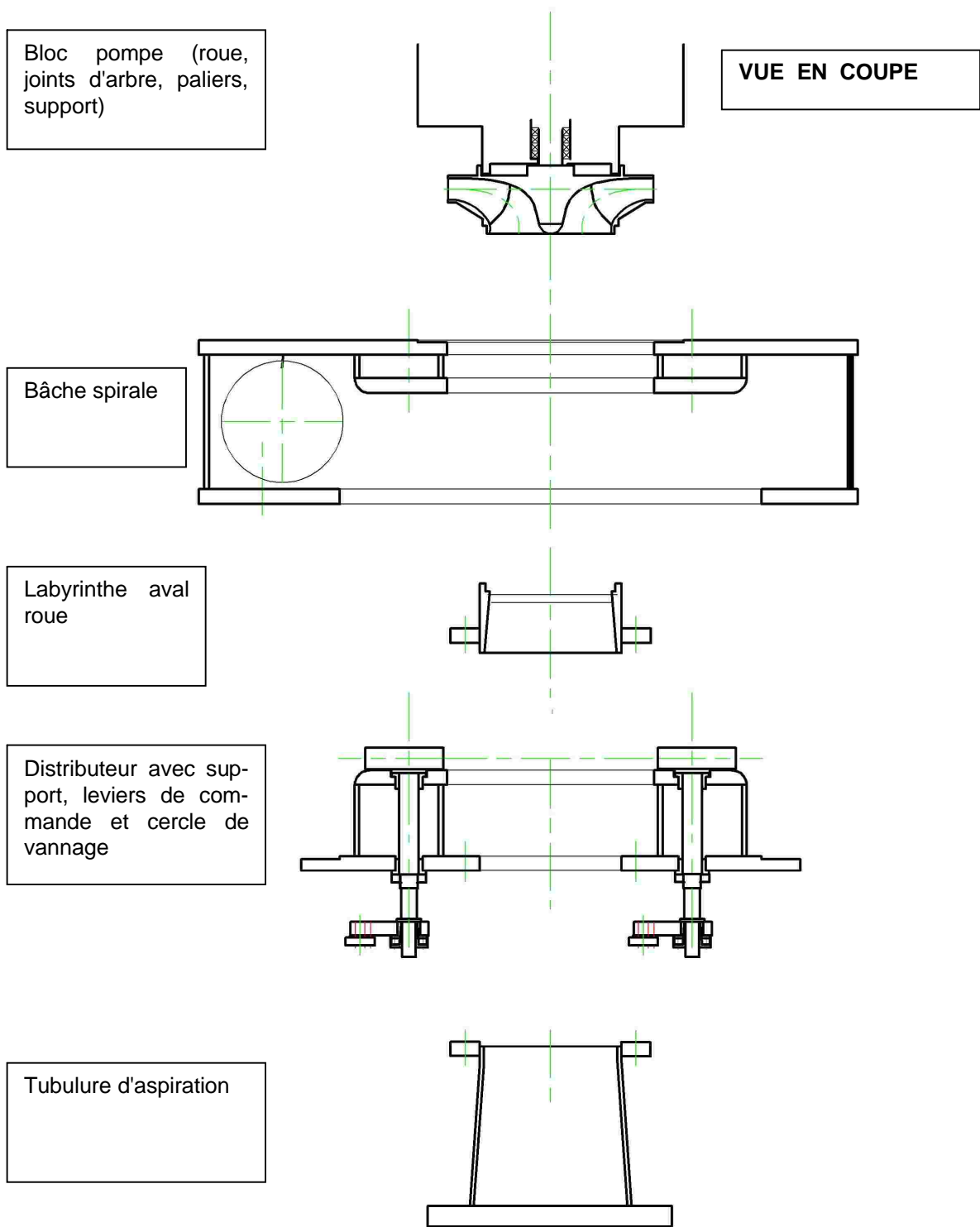


Figure 6.3.: PAT-Francis avec bâche spirale, vue éclatée et liste des composants