

30 Novembre 2022



Direction Territoriale Nord-Est
Direction de l'Ingénierie et de la Maîtrise d'Ouvrage (DIMOA)
Unité Opérationnelle de Nancy
169, rue de Newcastle
CO 80062
54036 Nancy Cedex



RIVIERE DE L'ORNAIN CANAL DE LA MARNE AU RHIN OUEST

BARRAGE DE MUSSEY

Mission MC5 - Phase Avant-projet
Etude de rentabilité
hydroélectrique



Sommaire

1	OBJET DU DOCUMENT	4
1.1	CONTEXTE	4
1.2	OBJET DU DOCUMENT	4
1.3	DONNEES D'ENTREES	5
1.4	METHODE	6
1.5	RESULTATS	7
	1.5.1 <i>Productible</i>	7
	1.5.2 <i>COUT D'investissement</i>	8
	1.5.3 <i>Recettes d'exploitation</i>	10
	1.5.4 <i>Coût de maintenance</i>	14
	1.5.5 <i>Coût d'exploitation</i>	14
2	BILAN COUT-BENEFICE.....	15
3	ANNEXES	17



Indice	Date	Objet modification	Auteur	Vérificateur
0	23/11/2022	Première émission	C. GALVAIN	
A	30/11/2022	2 ^{ème} émission	C. GALVAIN	S. WYTTEBACH

Ce document contient 16 pages + 2 annexes



1 OBJET DU DOCUMENT

1.1 CONTEXTE

Ce document fait suite à :

- L'étude EP indice B du barrage Mussey de janvier 2016.
- L'étude EP bis du barrage Mussey d'avril 2022.

L'objet du présent document est de réaliser une étude détaillée du potentiel hydroélectrique sur le barrage de Mussey en apportant des compléments et des informations plus précises par rapport à l'étude EP bis d'avril 2022.

1.2 OBJET DU DOCUMENT

Ce document étudie la rentabilité économique hydroélectrique sur le barrage de Mussey :

- Etude du coût d'installation
- Etude du coût d'exploitation
- Etude du coût maintenance
- Etude de rentabilité économique



1.3 DONNEES D'ENTREES

Données d'entrées issue de VNF :

- Niveau RN amont = 162.85m NGF
- Q prélevé = 350L/s

Données d'entrées issue de de la conception :

- Q pap = 500L/s
- Q turbinable = Qornain – 850 L/s

Données issues de la station hydrométrique de Val d'Ornain :

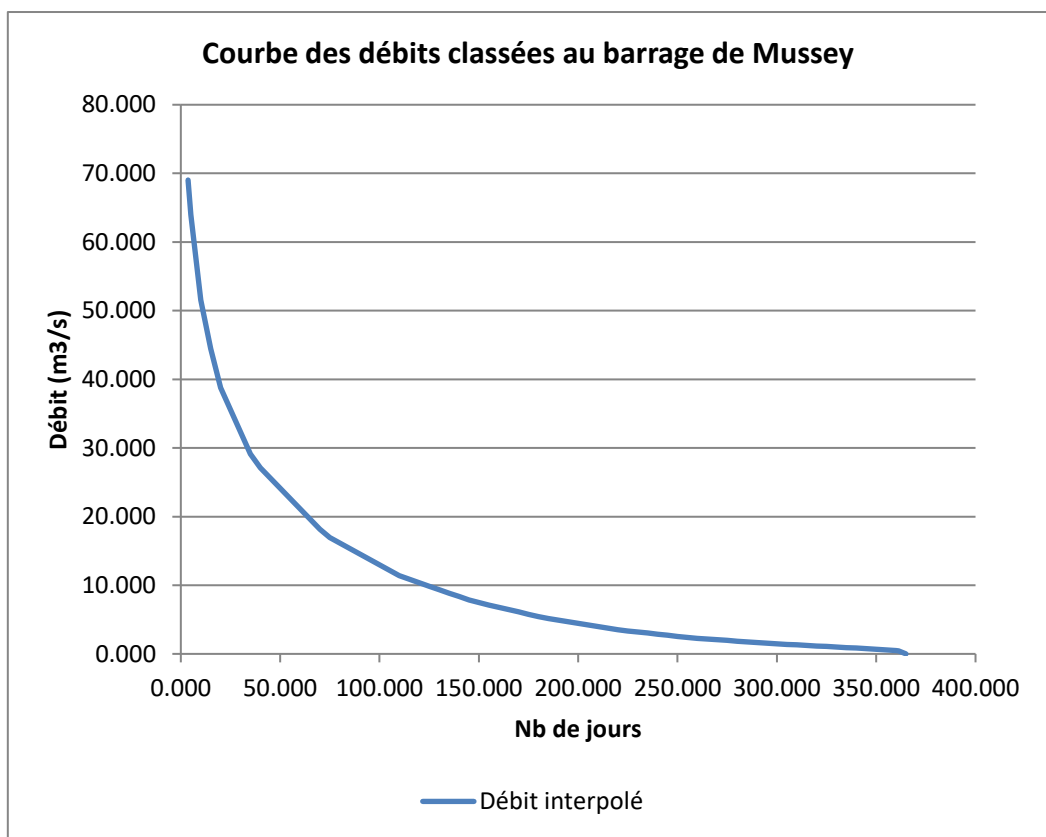


Figure 1 : Courbe des débits classés au niveau du barrage de Mussey

Données issues de la mission complémentaire MC1 (étude hydrologique et hydraulique):

Débit station hydrométrique (m³/s)					Débits au niveau du barrage de Mussey
Mois	Moyenne des minimums observés mensuels	Moyen mensuel	Module interannuel	Moyenne des maximums observés mensuels	Moyen mensuel
Janvier	8.24	23.1	10.9	52.77	23.19
Février	8.81	23.7	10.9	51.83	23.79
Mars	6.43	17.5	10.9	37.88	17.57
Avril	5.44	11.7	10.9	23.47	11.74



Débit station hydrométrique (m³/s)					Débites au niveau du barrage de Mussey
Mai	3.39	7.38	10.9	16.28	7.41
Juin	1.91	4.57	10.9	10.37	4.59
Juillet	1.32	3.27	10.9	9.16	3.28
Août	1.05	2.43	10.9	8.05	2.44
Septembre	0.90	2.45	10.9	7.34	2.46
Octobre	1.49	5.11	10.9	15.14	5.13
Novembre	3.49	10.5	10.9	26.37	10.54
Décembre	5.89	19.7	10.9	50.27	19.78

Tableau 1 : Bilan des données hydrologiques au niveau du barrage de Mussey

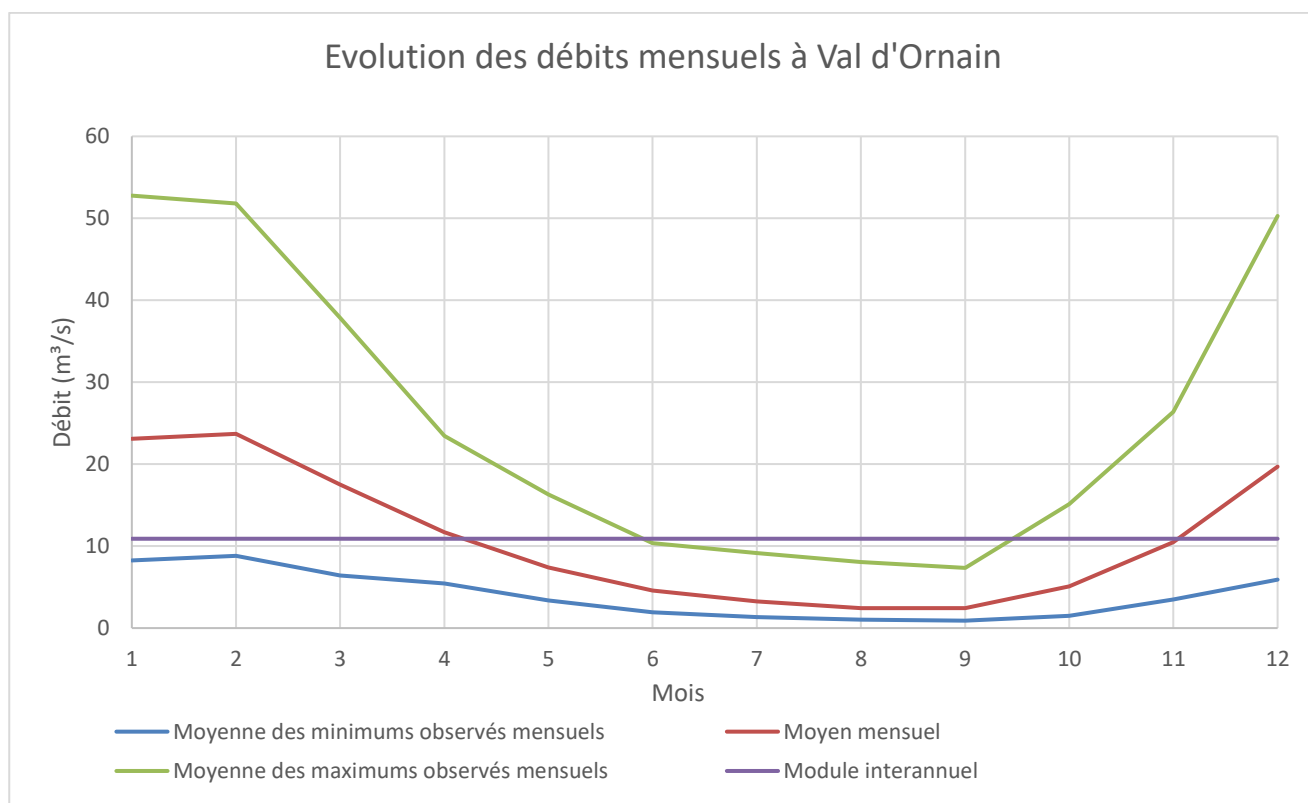


Figure 2 : Bilan des données hydrologiques au niveau du barrage de Mussey

L'étude MC1 conclue aussi que l'installation d'un seul groupe turbine est envisageable. L'installation d'un second groupe turbine réduirait de manière trop importante la section hydraulique.

Dans l'étude DIA, le potentiel hydroélectrique a été calculé pour un débit équipé de 10 et de 15 m³/s avec une chute d'eau entre 2.22 et 2.32 m. Cette étude DIA a déterminé qu'une VLH (Very Low Head) de diamètre 3150 mm à 4000 mm était la meilleure solution technico-économique. Ces différentes solutions seront donc étudiées l'une après l'autre.

1.4 METHODE

La méthode utilisée est déclinée de la manière suivante :

1. Bilan des données d'entrées
2. Etude de la puissance électrique pour la VLH 3150 mm en considérant les données suivantes :





- a. Discretisation des valeurs de débits classées avec une valeur tous les 5 jours
 - b. Non fonctionnement de la turbine dès que le débit de l'Ornain atteint 15% du débit d'équipement de la turbine.
 - c. Fonctionnement de la turbine sur une durée égale à 98% de la durée potentielle de fonctionnement. Cela permet de prendre en compte une maintenance de l'ouvrage.
3. Etude du cout de construction du génie civil, des équipements électromécaniques, du poste MCR (Mesures-commandes-régulation) ainsi que les divers autres postes.
 4. Etude des recettes d'exploitation en considérant un tarif réglementé 1 composante unique ou 2 composantes (été /hiver) et la puissance électrique précédemment calculée.
 5. Etude des couts d'exploitation et de maintenance
 6. Bilan Cout-bénéfice sur l'ouvrage VLH 31500mm

Cette méthode est dupliquée pour analyser les VLH avec un autre diamètre.

À la suite d'une consultation avec les fournisseurs de VLH, il est devenu apparent que la turbine de diamètre 4000 mm n'était pas un choix pertinent. Ce diamètre de turbine ne sera donc pas étudié dans cette note d'étude.

1.5 RESULTATS

1.5.1 PRODUCTIBLE

Les productions totales annuelles obtenues sont les suivantes

	Débit d'équipement (m3/s)	Production annuelle en MWh/an	Puissance maximale (kW)
VLH 3150 mm	10	633	166
VLH 3550 mm	12,8	706	204

Tableau 2 : Comparaison de production annuel entre différents diamètres de turbine VLH

Ce débit d'équipement est issu de données fournisseurs selon le type de turbine et la hauteur de chute moyenne. Dans le cas du barrage de Mussey, la hauteur de chute moyenne est de 2.2m. La hauteur de chute maximale est de 2.8m.



1.5.2 COUT D'INVESTISSEMENT

1.5.2.1 *Eléments intégrés au chiffrage*

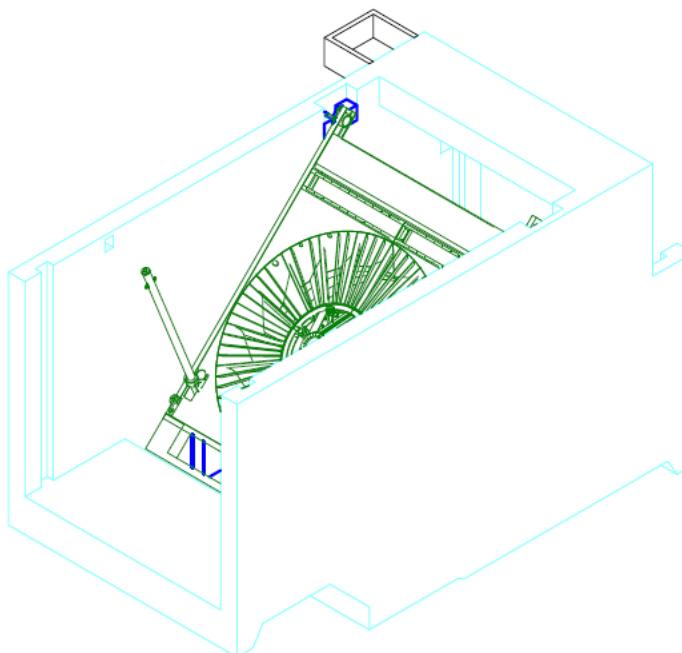


Figure 3 : Vue en 3D d'une VLH

Les éléments intégrés au chiffrage ci-dessous sont les éléments suivants :

1. Equipements électromécaniques :

- Groupe turbogénérateur VLH complet avec son distributeur, sa roue et le générateur PMG
- Dispositif de dégrillage intégré avec bras rotatif et volet abattant
- Système de relevage du groupe standard pour inspection et maintenance
- Centrale à huile pour commande des divers organes
- Compresseur de pressurisation du groupe
- Armoire de contrôle commande intégrant le système de variation de vitesse
- Filtre et équipements pour connexion Basse Tension
- TG4 & TGBT
- Câbles et tuyauteries de liaison de l'ensemble au droit du pivot de la VLH coté berge
- Pompe automatique de graissage
- Transport sur site
- Installation et mise en service de la VLH
- Vannes de dégrèvement afin d'éviter l'accumulation de sédiments en amont de la turbine
- Système d'asservissement et d'information DEIE avec le gestionnaire ENEDIS. Le DEIE (Dispositif d'Echange d'Informations d'Exploitation) est un dispositif d'échange entre Enedis et le site producteur raccordé au réseau public de distribution)

- Pré grille amont
- Divers câblage interliaisons entre la VLH et le local technique
- Estimation du raccordement électrique. (La liaison au raccordement électrique est fournie à titre estimatif indicatif. Seule la consultation auprès d'EDF est valable et sera à prendre en compte). Une étude payante doit ainsi être missionnée auprès d'ENEDIS pour calculer le coût et le choix du type de raccordement.

Le point de raccordement actuellement pressenti pour le raccordement au réseau électrique est situé à 446 de la centrale hydroélectrique.

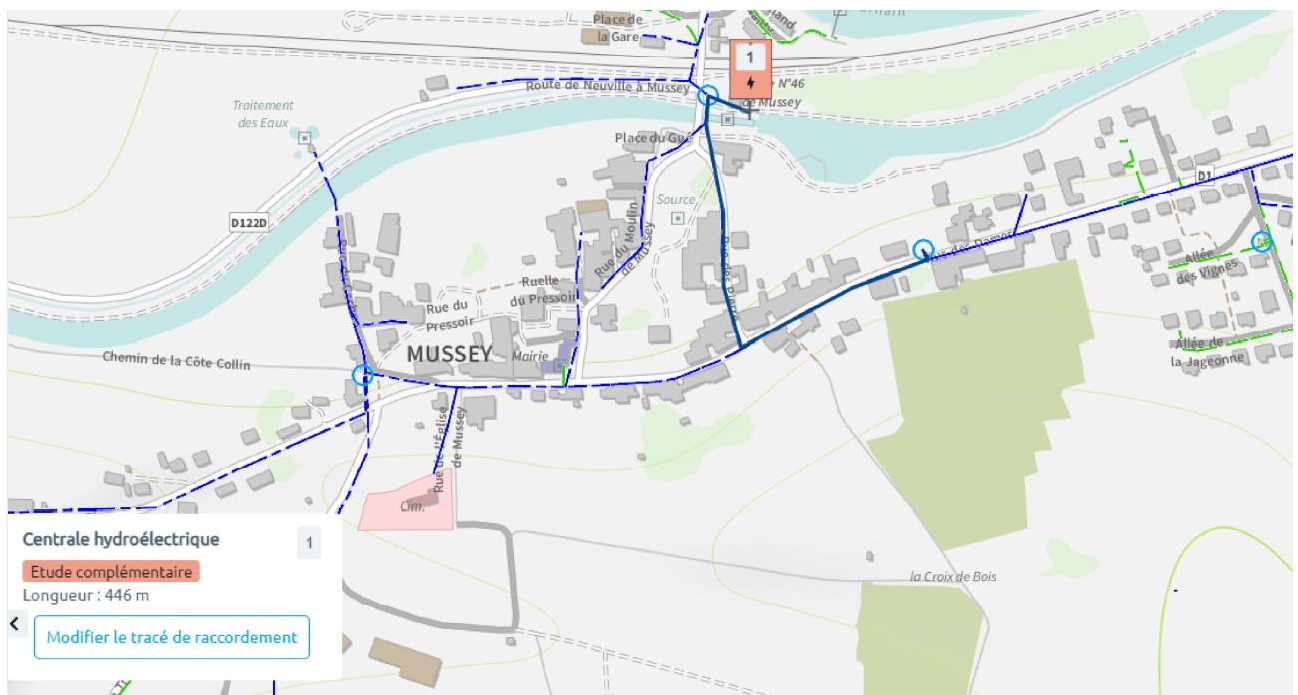


Figure 4 : Point de raccordement au réseau électrique actuellement envisagé

2. Génie civil :

- Travaux préparatoires – terrassement
- Ensemble de la structure (bajoyer, pieux, béton armé, enrochements, etc.)
- Passerelle avec garde-corps au-dessus de la VLH



1.5.2.2 Cout d'investissement

	VLH 3150	VLH 3550
	Cout en (k€)	
Equipements électromécaniques		
Turbines et contrôle commande	757	783
Vanne de dégrèvement	33	35
Pré grille amont	32	32
Batardeaux de maintenance passe VLH	65	70
Système d'asservissement et d'information DEIE avec le gestionnaire ENEDIS	6.5	6.5
Divers câblage interliaisons VLH local technique	16	16
Réseau électrique revente + liaison entre coffret EDF et le local technique	74	74
Sous-total	983	1015
Génie civil, terrassement, passerelle		
Sous-total	810	860

Tableau 3 : Bilan des différents postes liés à la construction d'une VLH

	VLH 3150	VLH 3550
	Coût en (k€)	
Cout total HT	1790	1880
Aléas et non-métrables 20%	2150	2260
Cout Total TTC 20%	2580	2710

Tableau 4 : Bilan des coûts d'investissement pour la construction d'une VLH

Ces incertitudes de 20% prennent en compte de potentiels aléas géotechniques ou autres aléas.

Les options suivantes ne sont pas incluses :

- Dégrilleur fixe + plan de grille à barreaux // espacement 100mm fixés sur le distributeur VLH
- Etude et fourniture réseau de terre
- Protection cathodique
- Caméra de surveillance
- Maîtrise d'ouvrage, Maîtrise d'œuvre, Coordination SPS, Contrôle externe.

1.5.3 RECETTES D'EXPLOITATION

1.5.3.1 Aspect législatif

Le cadre de soutien actuellement en vigueur pour les installations hydroélectriques d'une puissance installée strictement inférieure à 1 MW est défini par l'arrêté tarifaire du 13 décembre 2016, ci-après désigné «H16 ».

Il s'agit d'un dispositif ouvrant droit à un contrat de soutien sur 20 ans :

- d'obligation d'achat (OA) pour les installations de puissance inférieure ou égale à 500 kW ;
- de complément de rémunération (CR) pour les installations de puissance strictement inférieure 1 MW.

L'arrêté prévoit un niveau de rémunération différencié selon :

- la puissance de l'installation, avec un seuil à 500 kW et un niveau constant de part et d'autre ;



- la préexistence ou non de l'installation, le niveau de soutien des rénovations dépendant du montant du programme d'investissement entrepris, devant en outre être justifié ;
- la hauteur de la chute - le seuil étant fixé à 30 mètres - ou qu'il s'agisse ou non de turbiner un débit réservé.

D'après le code de l'énergie, une centrale hydroélectrique est considérée de basse chute sur si la hauteur de chute est égale ou inférieure à 30m. C'est bien le cas pour le barrage de Mussey.

1.5.3.2 Aspect économique

D'après l'arrêté H16 du 13 décembre 2016 et dans les conditions hydrologiques présentes sur Mussey, EDF est dans l'obligation d'achat au tarif réglementé suivant :

- En 2021, le prix d'obligation d'achat sur un tel contrat en considérant un tarif monocomposant avec un (prix de rachat constant sur l'année) est de l'ordre de 14.7 c€/kWh ou 147€/MWh
- En 2021, le prix d'obligation d'achat sur un tel contrat en considérant un tarif bicomposants avec un (prix de rachat variable sur l'année) est de l'ordre de :
 - 107€/MWh pour la tarification été. Cette tarification est valable du 1^{er} avril au 31 octobre.
 - 203€ pour la tarification hiver. Cette tarification est valable du 1^{er} novembre au 31 mars.

L'arrêté H16 prévoit aussi un plafond de 120 000 heures de fonctionnement équivalent pleine puissance sur la durée du contrat soit 20 ans. Au-delà de ce plafond, le tarif d'achat est fixé à 40 €/MWh pour les installations sous obligation d'achat.

Afin de tenir compte de l'évolution des coûts d'exploitation en cours de contrat, le tarif fixé est ensuite indexé à hauteur de 50 % tous les ans selon l'évolution de l'indice L défini tel que :

$$L = 0,5 + 0,4 \frac{ICHTrev - TS}{ICHTrev - TS_0} + 0,1 \frac{FM0ABE0000}{FM0ABE0000_0}$$

Équation 1 : Formule de calcul pour l'indice L, valeur d'indexation annuel

Formule dans laquelle :

- ICHTrev-TS est la dernière valeur définitive connue au 1^{er} janvier de chaque année de l'indice du coût horaire du travail (tous salariés) dans les industries mécaniques et électriques ;
- FM0ABE0000 est la dernière valeur définitive connue au 1^{er} janvier de chaque année de l'indice des prix à la production de l'industrie et des services aux entreprises pour l'ensemble de l'industrie (marché français) ;
- ICHTrev-TS₀ et FM0ABE0000₀ sont les dernières valeurs définitives des indices ICHTrev-TS et FM0ABE0000 connues à la date de prise d'effet du contrat d'achat.

De plus, il est possible d'avoir un complément de rémunération (CR) au prix d'obligation d'achat précédent. Ce complément de rémunération est versé uniquement si le producteur n'a pas reçu d'aide financière de la part de l'Etat, de collectivités ou d'établissements publics pour la réalisation du son projet.

La formule de calcul du complément annuel de rémunération est la suivante :

$$CR = Eelec \times (Te - M0 + Pgestion) - Nbcapa \times Prefcapa$$

Équation 2 : calcul du complément de rémunération

Formule dans laquelle :





- **Eelec** est la puissance électrique moyenne livrée sur le réseau pendant les heures où le prix est positif ou nul sur la bourse EPEX Spot SE pour la zone France. Cette valeur est plafonnée à un volume équivalent à 120 000 heures de fonctionnement à pleine puissance sur la durée du contrat. La durée des contrats est de 20 ans.

En considérant les plages de fonctionnement suivantes:

- une plage de fonctionnement d'environ 260 jours/an et de 230 jours/an pour les débits équipés de respectivement 10m³/s et 12.8m³/s, du fait du débrayage en-dessous de 15% du débit d'équipement,
- une marge de 2% pour prendre en compte la maintenance des ouvrages,

le nombre d'heures de production possible sur 20 ans est respectivement de 122 300 heures et de 115250 pour une turbine de 3150 mm et de 3550mm. Cette première valeur est donc réduite pour atteindre le plafond de 120 000 heures.

- **Te** est le tarif de référence. La valeur 2021 est 14.7c€/kWh.

- **M0** est le prix de marché de référence, il est égal à la moyenne arithmétique sur l'année civile des prix spots horaires positifs ou nuls pour livraison le lendemain constaté sur la bourse de l'électricité EPEX Spot SE pour la zone France. La valeur 2021 est 110.07€/MW

- **Pgestion** est la prime unitaire de gestion. Elle est égale à 2 €/MWh sur l'ensemble de la durée de vie du contrat ;

- **Nbcapa** est le nombre de garanties de capacité, défini comme 70 % de la puissance maximale de l'installation dans le cas où l'installation est soumise au régime générique de certification.

- **Prefcapa** est le prix de marché de la capacité, exprimé en €/MW et défini comme la moyenne arithmétique des prix observés lors des sessions d'enchères organisées pendant l'année civile précédant l'année de livraison. La valeur 2021 est 28,428.3€/MW.

Les résultats obtenus sont les suivants :

Recette d'exploitation Mussey - tarif 1 composante				
Diamètre VLH	Recettes annuelles hors CR (€)	Durée rentabilisation hors CR (années)	Recettes annuelles avec CR (k€)	Durée rentabilisation avec CR (années)
VLH 3150 mm	91,900 €	22.4	113,200 €	18.2
VLH 3550 mm	103,900 €	20.9	127,900 €	17

Recette d'exploitation Mussey - tarif 2 composantes (été /hiver)				
Débit équipé	Recettes annuelles hors CR (€)	Durée rentabilisation hors CR (années)	Recettes annuelles avec CR (€)	Durée rentabilisation avec CR (années)
VLH 3150 mm	133,300 €	15.4	154,600 €	13.3
VLH 3550 mm	149,900 €	14.5	173,900 €	12.5

Tableau 5 : Recettes et durée de rentabilisation pour deux diamètres de turbines VLH

Les graphiques ci-dessous montrent les recettes annuelles et la durée de rentabilisation avec/sans CR.

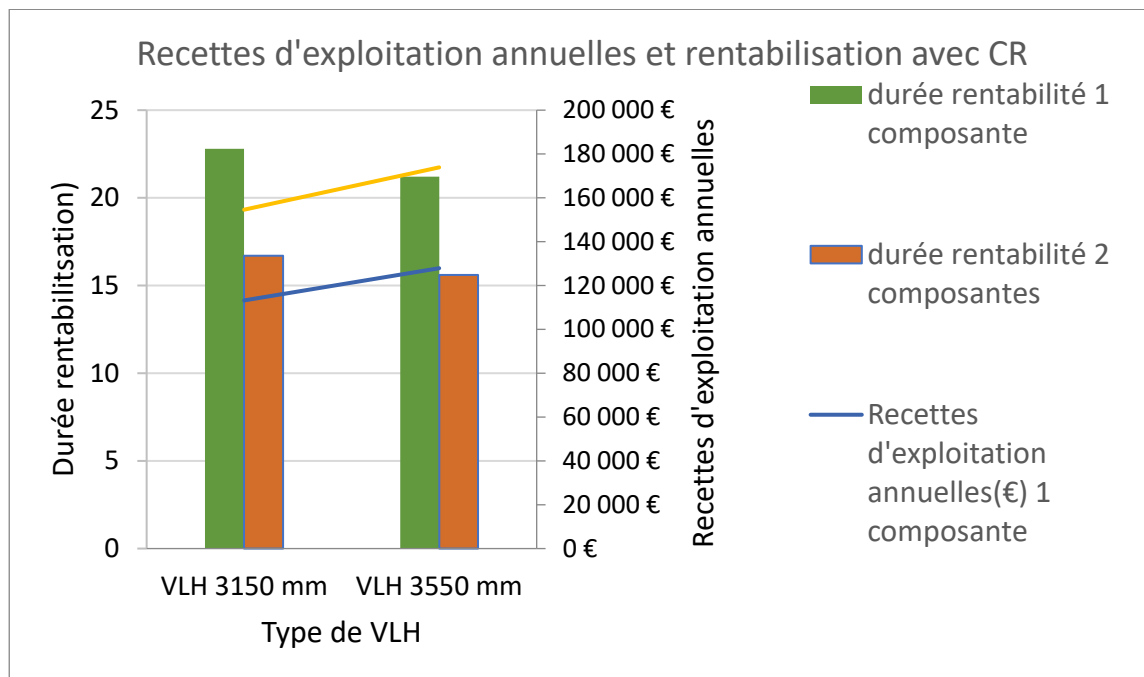


Figure 5 : recettes d'exploitation et rentabilisation avec CR

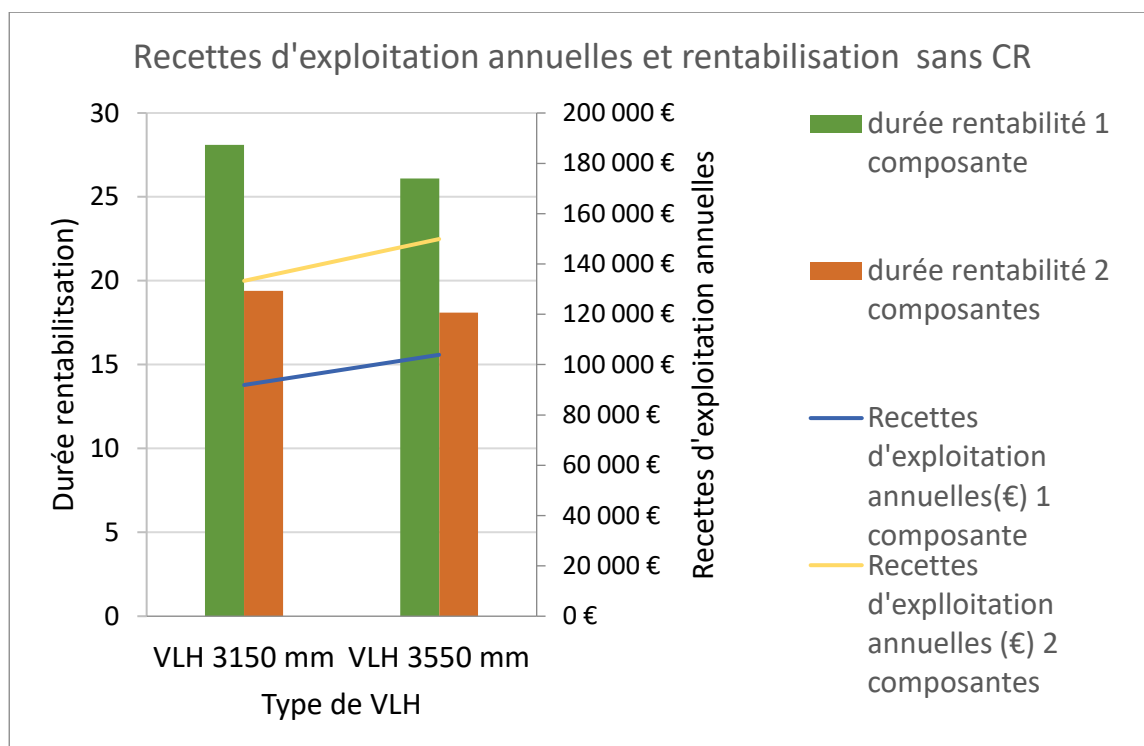


Figure 6 : recettes d'exploitation et rentabilisation sans CR

Les recettes annuelles sont 10% plus élevées avec une turbine de diamètre 3550 mm, soit environ 20k€ supplémentaires, qu'avec une turbine de 3150 mm. Comme le coût d'investissement entre les deux turbines



est seulement de 130k€ euros, la durée de rentabilisation de la VLH 3550 mm est plus rapide que celle de 3150mm.

Le tarif avec 2 composantes (été /hiver) est plus rentable que la tarification avec une composante unique. La durée de rentabilisation est diminuée d'environ 5 ans quel que soit le diamètre de la VLH.

L'apport du CR est non négligeable dans la durée de rentabilité (différence de 2 à 4 ans selon la tarification choisie). Il est rappelé que toutes les installations ne sont pas éligibles au CR ; cela dépend notamment si la société a reçu une subvention pour la construction de la centrale.

1.5.4 COUT DE MAINTENANCE

Globalement, les couts de maintenance sont assez faibles sur ce type de turbines.

La maintenance préventive nécessite environ 100 à 150 heures par an.

La maintenance corrective programmée nécessite

Les couts de maintenance sont répartis de la manière suivante :

Type de maintenance/d'opérations	Matériel	Fréquence	Cout associé (k€)	Cout associé sur 1 an (k€)
Automatismes, sondes, télétransmissions, installations électriques	Electromécanique	Annuelle	10	10
Graissage vannerie et contrôle étanchéité. Essai d'ouverture et de fermeture des vannes	Mécanique	Annuelle		
Contrôle des niveaux d'huile, du fonctionnement des pompes, de l'état des raccords.	Hydraulique	Annuelle		
Maintenance lourde des équipements de la VLH (GER)	Divers	10 ans	70	7
Retouches, entretien	Peinture	5 ans	2	0.4
Reprise des parements, maçonneries, enrochements	Génie civil/ structure	50 ans	20	0.4
Total lissé sur 1 an				18

Tableau 6 : Maintenance à mettre en œuvre et fréquence

De plus, il est nécessaire d'anticiper le changement de certaines pièces en cas de panne. Les opérations de maintenance lourde (GER) nécessitent l'installation d'un batardeau temporaire à l'amont et à l'aval de la turbine.

1.5.5 COUT D'EXPLOITATION

Au stade AVP, il est considéré que les coûts d'exploitation ne sont pas supérieurs aux coûts d'exploitation du barrage. En effet la même équipe d'exploitation devra gérer le barrage et la VLH.



2 BILAN COUT-BENEFICE

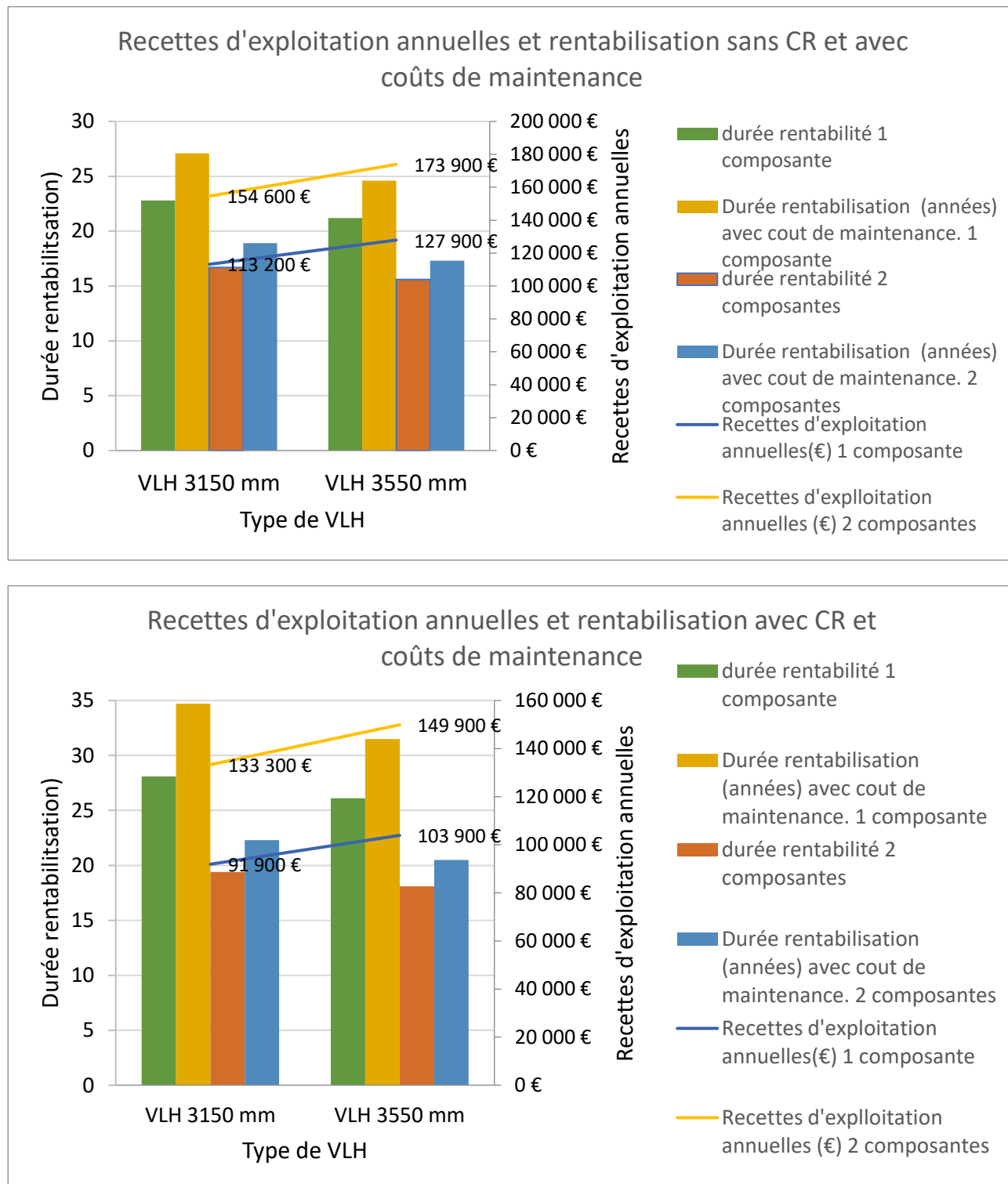


Figure 7 : recettes d'exploitation et rentabilisation avec/ sans CR et en intégrant les couts de maintenance



D'après les résultats obtenus, l'installation d'une turbine VLH est rentable dans une durée comprise entre 17 et 34 ans selon le diamètre de la turbine, la tarification choisie et la possibilité d'avoir un complément de rémunération. Le site est donc propice à son installation.

Le choix optimal est une turbine de diamètre 3550 mm avec une tarification été/hiver. Cette tarification a l'avantage de turbiner au maximum le débit important de l'Ornain pendant l'hiver. La durée de rentabilisation est alors comprise entre 17 et 20 ans selon la possibilité d'avoir un complément de rémunération. La puissance électrique maximale avec une turbine de 3550 mm est de 204 kW pour une production annuelle de 706 000 kWh.

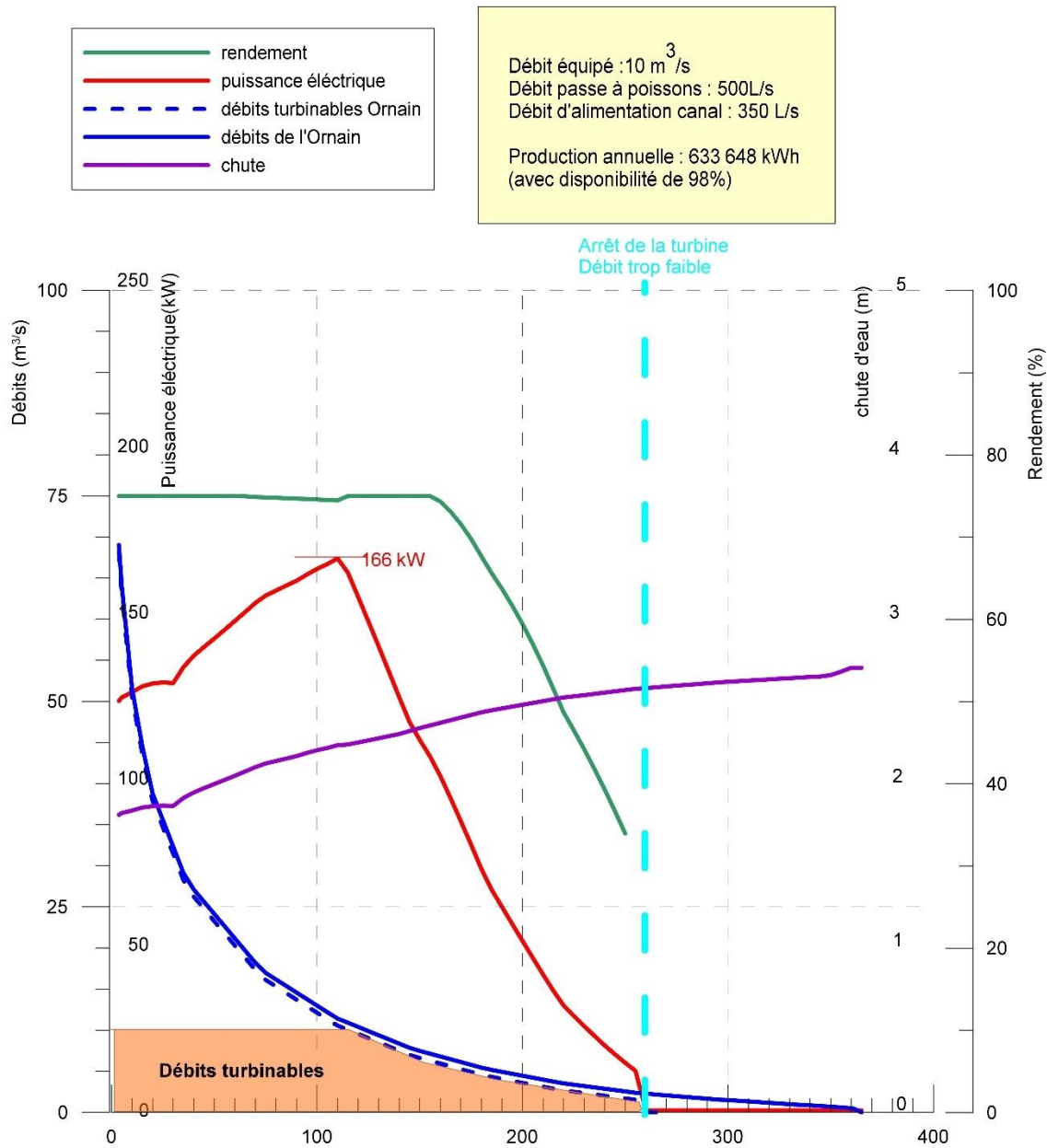
Enfin cette étude est basée sur le cout actuel de l'énergie. Dans le contexte actuel, il est probable que le cout de l'énergie augmente et que la durée de rentabilisation soit plus rapide.

Barrage		Débit d'amorçage (m3/s)		Débit fonctionnement nominal (m3/s)		Puissance maximale		
		Ornain	VLH	Ornain	VLH	Total nette (kWh annuel)	Total nette fournie (kW)	Brut installée (kW)
Mussey	VLH 3150 mm	2.38	1.5	10.9	10	633000	166	223
	VLH 3550 mm	2.87	1.92	13.8	12.8	706000	204	272

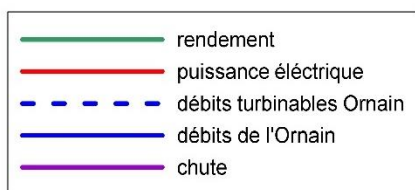
Tableau 7: Bilan sur les débits de fonctionnement et sur la puissance électrique délivrée



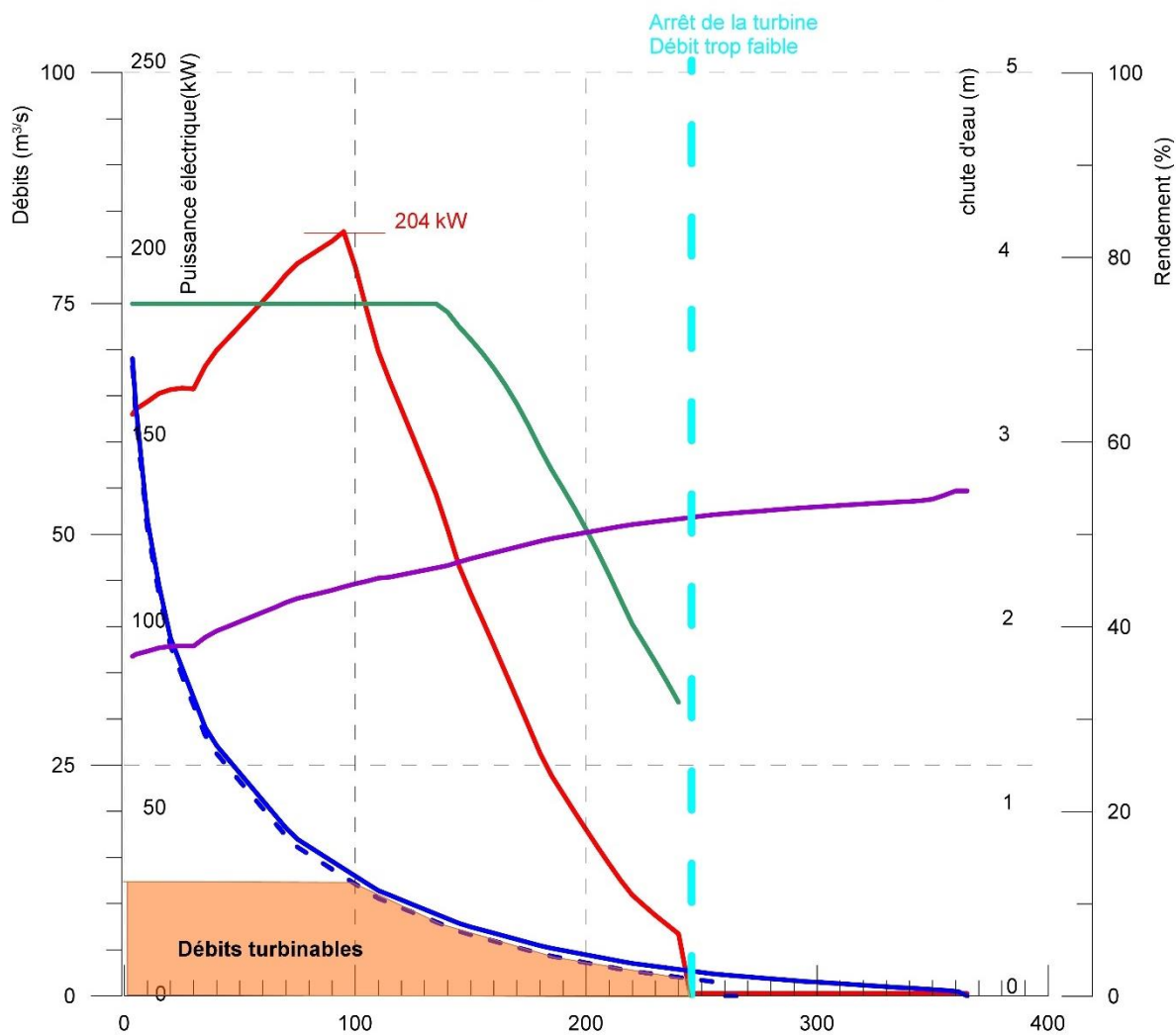
3 ANNEXES



BARRAGES DE L'ORNAIN - ETUDE HYDRAULIQUE		Figure
 Débites, chutes et puissances électriques pour le barrage de Mussey ($Q_{\text{équipé}} = 10\text{m}^3/\text{s}$)		...



Débit équipé : $12.8 \text{ m}^3/\text{s}$
Débit passe à poissons : 500 L/s
Débit d'alimentation canal : 350 L/s
Production annuelle : $706\,151 \text{ kWh}$
(avec disponibilité de 98%)



BARRAGES DE L'ORNAIN - ETUDE HYDRAULIQUE		Figure
	Débits, chutes et puissances électriques pour le barrage de Mussey ($Q_{\text{équipé}} = 12.8 \text{ m}^3/\text{s}$)	...