

L'aménagement hydroélectrique d'Inga sur le Zaïre

Jacques Francou

Adjoint au chef du Service Technique Electricité de France
Direction des Affaires Extérieures et de la Coopération

Le site d'Inga

Le fleuve Zaïre est —après l'Amazone— le deuxième du monde tant par la superficie de son bassin versant (3 800 000 km²) que par l'importance de ses débits. Sa situation géographique privilégiée, à cheval sur l'équateur, confère au régime hydrologique une rare stabilité : sur la base d'observations qui couvrent une période ininterrompue de 72 années, le module interannuel s'établit à 40 000 m³/s, et le débit dépassé pendant 98 % du temps s'élève encore à 26 400 m³/s.

Le profil en long est, lui aussi, exceptionnel : après avoir traversé la cuvette centrale, pratiquement horizontale et navigable sur 1 730 kilomètres, le fleuve s'élançe vers l'Océan dans une succession de rapides dont la dénivellation est, entre Kinshasa et Matadi, de 255 mètres. La série de rapides la plus impressionnante constitue le site d'Inga, où l'on relève une chute de 98 mètres entre l'île de Sikila et le confluent de la Bundi, que sépare une distance en ligne droite de 15 kilomètres seulement.

Ces caractéristiques naturelles font d'Inga le plus important gisement de puissance hydraulique concentrée en un même point : la production annuelle du site complètement équipé serait de 305 TWh (1) soit à titre d'exemple les consommations électriques réunies de la France et de l'Italie en 1973.

*
* *

Malgré ces privilèges, l'ampleur même d'un tel équipement ne pouvait qu'en retarder l'entreprise, si la topo-

graphie très remarquable n'avait offert le choix entre deux possibilités d'aménagement :

— Le schéma N'Kokolo ne nécessite pas de barrer le fleuve. Il utilise une vallée morte dont l'extrémité a été fermée par le barrage de Shongo : celui-ci permet d'utiliser sous 60 mètres de chute une fraction du débit d'étiage, prélevée au fleuve 8 kilomètres en amont.

L'usine d'Inga 1, en service, et celle d'Inga 2, en construction, utilisent ce schéma et pourront fournir 11 TWh chaque année, à partir de 1980. Il est possible de poursuivre dans la même voie, en réalisant l'aménagement d'Inga 3 qui comporterait une usine (ou peut-être deux usines), susceptible de doubler (ou éventuellement de tripler) cette productibilité.

— Le schéma Grand Inga implique le barrage du fleuve qui permettra de dériver les eaux vers la vallée voisine de la Bundi et d'utiliser ainsi la totalité du débit d'étiage sous une chute de 150 mètres. Ce schéma "shunte" le précédent, puisqu'il prendra l'eau à son amont pour la restituer à son aval : il permettra d'alimenter une colossale usine de 39 000 MW, fractionnée en 13 tranches identiques de 4 groupes chacune, que l'on n'entreprendrait qu'en fonction du développement des besoins.

* *
* *

A l'heure où l'approvisionnement énergétique du monde industriel pose les problèmes que l'on sait et mobilise la politique internationale, l'étude du site d'Inga débouche sur un paradoxe surprenant : il est possible d'y produire en abondance une énergie "propre" sûre, économiquement sans concurrence, cependant que le plus difficile est de trouver une destination à cette inépuisable richesse naturelle...

(1) TWh = TéraWattheure, ou milliard de kWh.

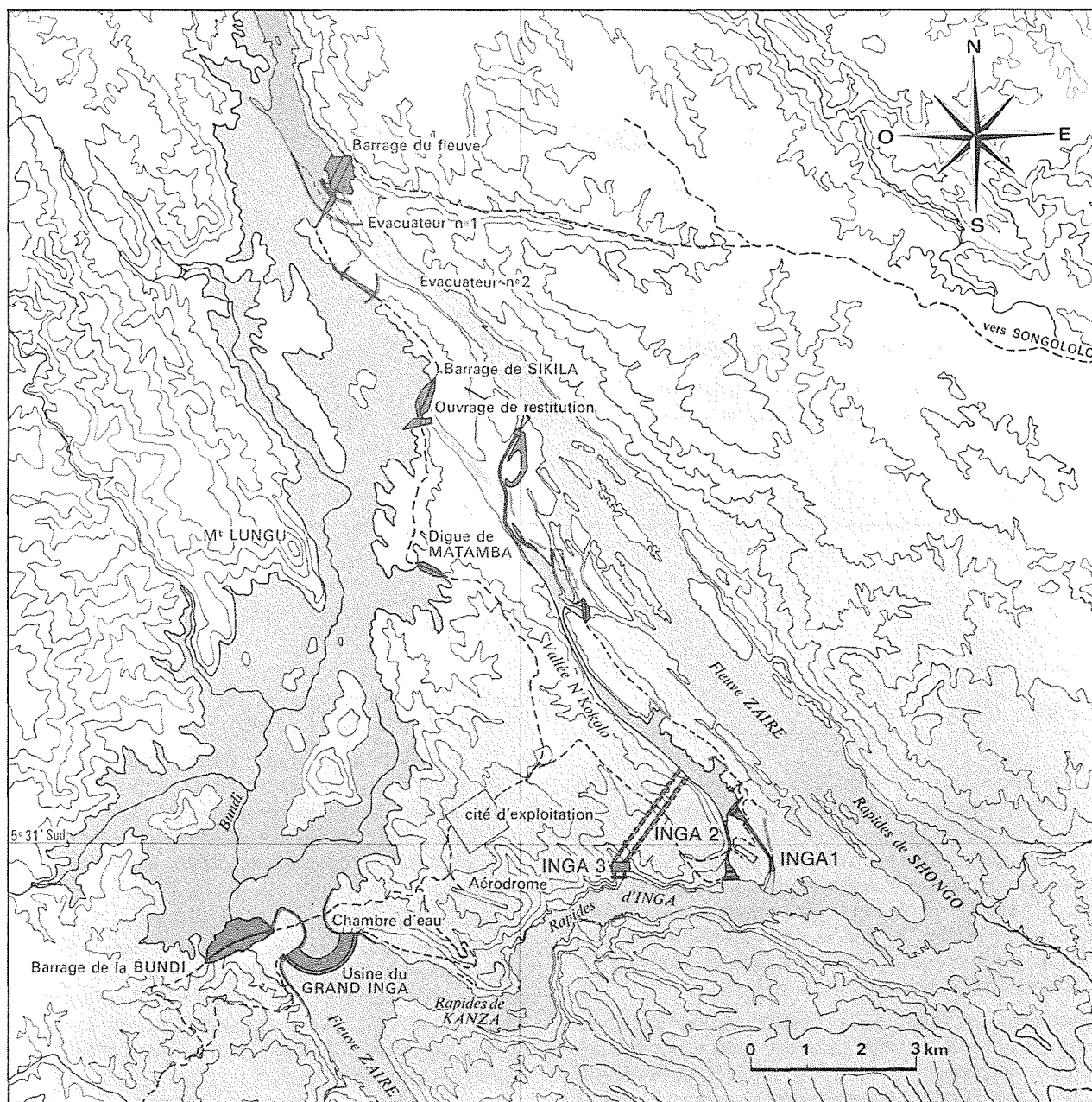


Figure 1 – Plan d'aménagement général.

Grâce à ses deux schémas d'équipement, Inga est en mesure de s'adapter à toute hypothèse de développement industriel.

Le même site offre donc la possibilité de choisir entre deux équipements dont l'un serait pratiquement dix fois plus puissant que l'autre. Cette faculté est certainement rare, mais il est presque incroyable que l'intérêt des deux schémas soit tel que l'on puisse, dans l'un et l'autre cas, en entreprendre la réalisation – dans des conditions économiques déjà fort intéressantes – pour moins du dixième de leurs puissances respectives.

C'est ainsi que l'aménagement d'Inga 1, entrepris en 1968, représente moins de 1 % de la puissance totale équipable ; et l'on comprendra aussi que pour atteindre un taux d'équipement de l'ordre de 10 %, la question se posera inévitablement de savoir s'il est plus intéressant

de le faire en épuisant les ressources du schéma N'Kokolo ou en abordant celles du schéma Grand Inga.

La première phase d'équipement : Inga 1 et Inga 2

La rive droite du fleuve est bordée sur 15 kilomètres par une dépression naturelle – ancien bras secondaire abandonné par creusement du chenal principal – qui porte successivement les noms de Grande Vallée, vallée de Sikila, vallée N'Kokolo. Cette dépression n'est pas tout à fait continue : un léger relief, le col de Fwamalo, sépare la vallée de Sikila de celle de N'Kokolo.

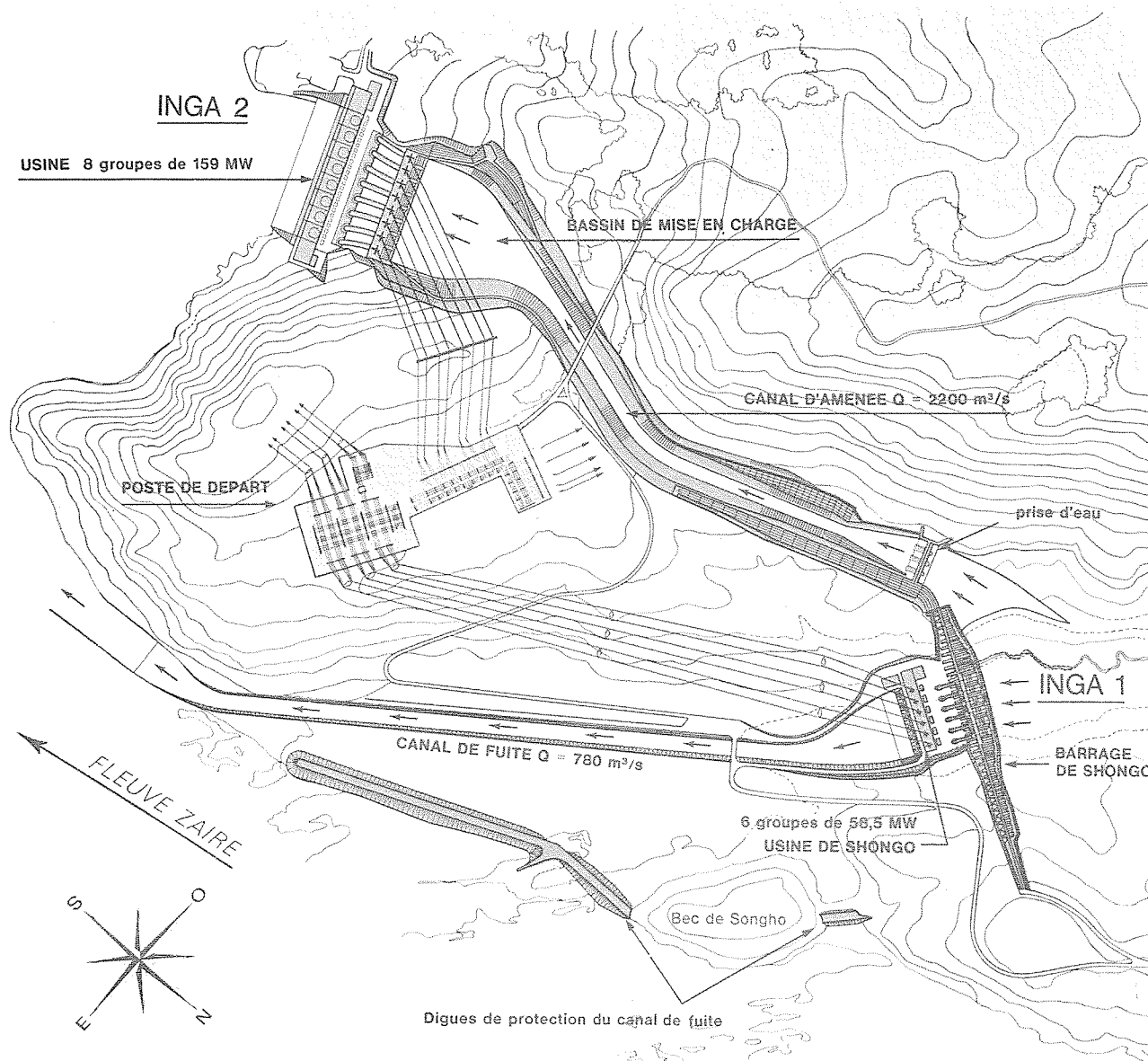


Figure 2 – Plan des ouvrages aval Inga 1 et 2.

Le schéma d'équipement suit au plus près cette topographie et comporte successivement :

- une prise d'eau en surface permettant de dériver une fraction du débit du fleuve : $2\,200\text{ m}^3/\text{s}$;
- un canal amont qui conduit ce prélèvement dans la vallée de Sikila ;
- une série d'ouvrages de protection qui empêchent le retour vers le fleuve des eaux dérivées ; le plus important est le barrage de Fwamalo, ouvrage en enrochements d'un volume de $520\,000\text{ m}^3$;
- un second canal qui efface le col de Fwamalo et alèse la partie amont de la vallée N'Kokolo ;
- le barrage de Shongo qui ferme cette même vallée à son débouché sur le fleuve et crée la chute utilisable ;
- les usines utilisatrices d'Inga 1 (350 MW) au pied même du barrage ; Inga 2 (1350 MW) qui sera alimentée par un canal à ciel ouvert partant de l'appui R.D. du barrage ; et dans l'avenir une éventuelle usine Inga 3 qui serait alimentée par un canal souterrain.

Ouvrage-clé de l'équipement de première phase, le barrage de Shongo est du type barrage à contreforts. Il mesure 587 mètres de longueur au couronnement, 52,50 mètres de hauteur maximale, au-dessus de la fondation, et a nécessité la mise en œuvre de $245\,000\text{ m}^3$ de béton.

L'aile rive droite du barrage se retourne vers l'aval pour constituer l'entonnement du canal qui alimentera l'usine d'Inga 2. Cette partie de l'ouvrage comporte 4 plots massifs disposés en arc de cercle et 4 pertuis de prise, larges chacun de 14 mètres et profonds de 22 mètres. Ces pertuis avaient été provisoirement batardés par des voûtes en béton qui ont été démolies lors de la mise en eau des ouvrages d'Inga 2, en septembre 76.

Les aménagements réalisés comportent des ouvrages en béton assez importants : $300\,000\text{ m}^3$ environ ont été mis en place pour Inga 1 et $500\,000\text{ m}^3$ environ pour Inga 2 ; mais ils ont surtout nécessité des travaux de déroctage considérables : plus de 5 millions de m^3 pour Inga 1 et 4 millions de m^3 pour Inga 2.

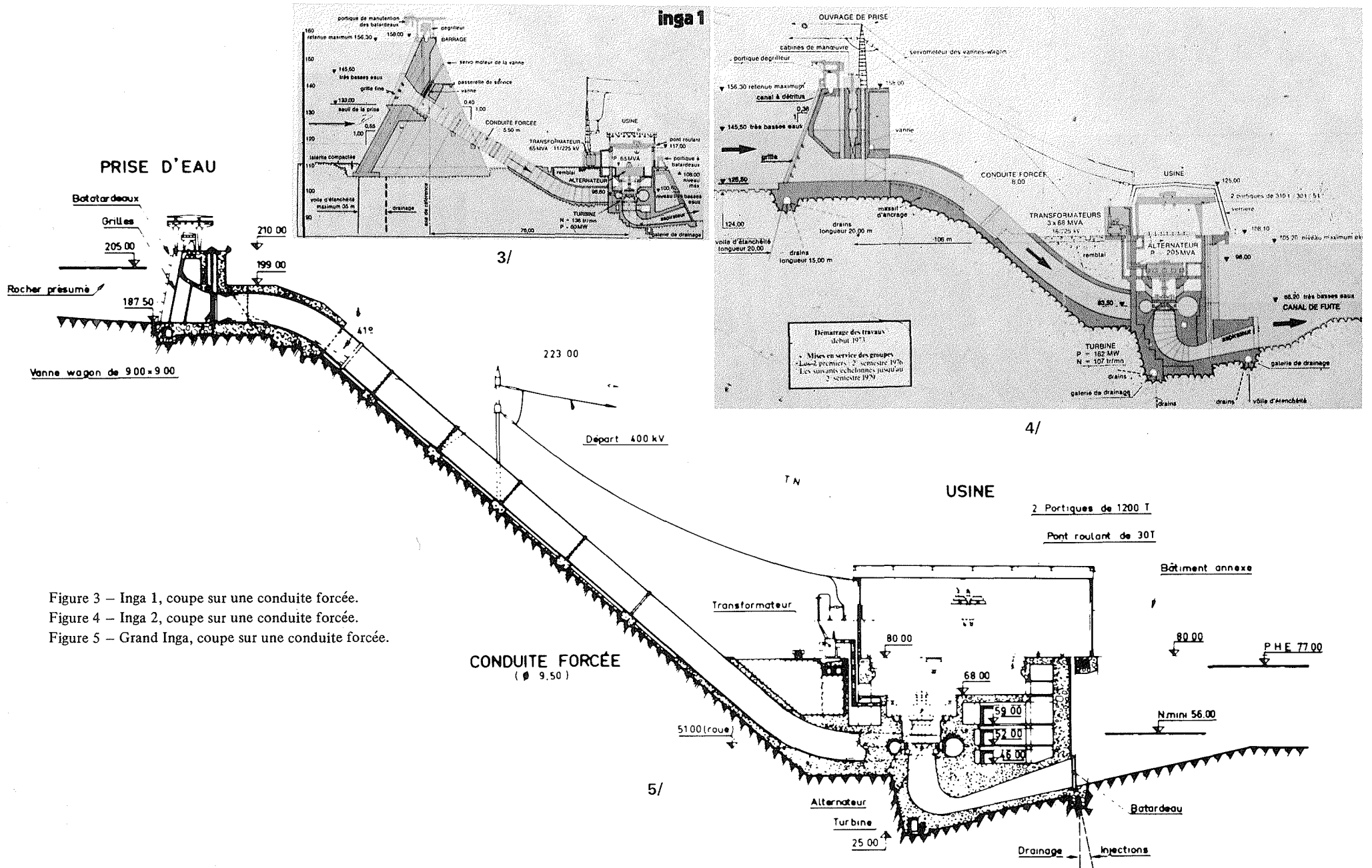


Figure 3 – Inga 1, coupe sur une conduite forcée.
 Figure 4 – Inga 2, coupe sur une conduite forcée.
 Figure 5 – Grand Inga, coupe sur une conduite forcée.

En ce qui concerne leur équipement, la première usine abrite 6 groupes de 65 MVA. La puissance nominale des turbines est de 60 MW, sous 50 m de chute, à la vitesse de 136 t/mn.

La deuxième usine abritera huit alternateurs de 205 MVA entraînés par des turbines de 162 MW sous 56 m de chute, à la vitesse de 107 t/mn.

Les six machines d'Inga 1 tournent depuis quatre ans pour la première d'entre elles, et deux ans pour la dernière. Quant aux groupes d'Inga 2, les premiers tours de roue de la première turbine sont prévus d'ici à un mois, et les mises en service devraient s'échelonner ensuite jusqu'à la fin de l'année 1979.

L'effet de ces deux aménagements sera de faire bondir la puissance installée dans le Bas-Zaïre de 70 MW en 1972 à 1 800 MW en 1890... L'énergie d'Inga doit être transportée pour une part vers la province forte consommatrice du Shaba : une ligne à courant continu de 1 800 kilomètres de longueur, devrait permettre ce transfert à partir de 1978. Il reste cependant que le Zaïre va se trouver très prochainement à la tête d'au minimum 1 000 MW inutilisés.

Est-ce tellement énorme ? Dans l'hypothèse même où cette puissance excédentaire n'aurait à satisfaire que les besoins spécifiquement zaïrois, elle serait absorbée d'ici une dizaine d'années, et par conséquent il faudrait entreprendre la poursuite de l'équipement, soit dans cinq ans si l'on choisit de réaliser Inga 3, soit dans quatre ans seulement si l'on opte pour le démarrage du Grand Inga, dont la première phase nécessite six ans de travaux. Et dans l'hypothèse, au contraire, où les autorités zaïroises placeraient 600 MW à des industriels étrangers, c'est en 1982 que l'ensemble actuellement réalisé serait saturé, et par conséquent il serait déjà un peu tard pour donner le premier coup de pioche du Grand Inga...

Le projet du grand Inga

Conception d'ensemble

Les dispositions retenues sont directement inspirées d'un contexte géologique et topographique particulièrement favorable :

- à l'amont du site (île de Sikila), en relevant le plan d'eau naturel d'une quarantaine de mètres, on conduira les eaux vers la vallée voisine d'un petit affluent de rive gauche : la Bundi. Ce même emplacement permet en même temps de réaliser la coupure du fleuve par un massif d'enrochements déversés, et de restituer au plus court les débits non turbinés ;
- à l'aval du site (embouchure de la Bundi), un second barrage en enrochements permettra de fermer la vallée affluente, créant un plan d'eau qui dominera le fleuve d'environ 150 mètres, immédiatement à l'aval des derniers rapides. La faible distance qui sépare la retenue de la rive du fleuve permet de concentrer ici l'ensemble des ouvrages utilisateurs.

Le parti adopté s'appuie sur d'autres caractères qu'il convient de citer :

- l'équipement d'un potentiel aussi important que celui du Grand Inga ne peut être réalisé que progressivement. Le coût des barrages est une dépense faite dès l'origine, indépendante du débit équipé ; pour réduire le poids des investissements de la première étape, il faut donc diminuer, autant que possible, le coût des ouvrages de production : prises d'eau, conduites forcées, usine. C'est pourquoi, ces ouvrages seront construits au fur et à mesure de l'équipement du site ;
 - il est économique d'utiliser pour les barrages tout ou partie des matériaux extraits des fouilles d'ouvrages aussi voisins que possibles. C'est ainsi que les produits du déroctage de la dérivation provisoire seront utilisés pour le barrage du fleuve et que les déblais de la chambre d'eau serviront à construire le barrage de la Bundi.
- Cette balance des déblais et des remblais détermine l'altitude de la retenue tendue par les barrages. Pour cette cote optimale, le volume total des déblais foisonné et amputé du volume des matériaux rebutés, correspond sensiblement à celui des remblais et des agrégats nécessaires aux bétons et aux filtres des digues. La retenue normale à 205,00 répond à ces considérations dans le cadre des ouvrages projetés ;
- la puissance unitaire des groupes est également un élément majeur du projet ; après examen des réalisations ou des projets internationaux les plus importants — tant aux Etats-Unis d'Amérique qu'en URSS ou au Brésil — il a été décidé de rester légèrement en deçà des records mondiaux et de fixer à 765 MW la puissance nominale de la turbine, soit une puissance électrique active de 750 MW aux bornes de l'alternateur ;
 - l'aspect inhabituel de l'ensemble prises d'eau-usine vaut également d'être souligné. La morphologie du terrain sur lequel ces ouvrages, entièrement à l'air libre, sont dessinés ainsi que les relations qui s'établissent entre leurs dimensions principales, conduisent à les disposer radialement sur deux arcs de cercles concentriques dont les rayons mesurent respectivement 447 m et 670 m.

Le barrage du fleuve

L'importance des débits du Zaïre, rarement inférieurs à 30 000 m³/s, domine la conception des ouvrages et, partant, le choix de leur implantation. Il est rapidement apparu au cours des études, que le barrage du fleuve ne pouvait être réalisé qu'en eaux vives par déversement d'enrochements jusqu'à coupure complète du lit ; toute méthode traditionnelle, comportant l'assèchement de l'emprise de l'ouvrage à l'abri de batardeaux, s'est en effet révélée pratiquement irréalisable.

Le procédé de construction retenu nécessite toutefois, pendant la montée des enrochements, une dérivation provisoire pour les eaux du Zaïre.

La décision de projeter un grand barrage en enrochements, sans mise à sec du lit du fleuve, s'est appuyée sur quelques précédents remarquables ; elle prend, cependant, un caractère exceptionnel en raison des débits que le Zaïre pourra présenter pendant les opérations de coupure et qui pourront atteindre $70\,000\text{ m}^3/\text{s}$ en crue.

Il était nécessaire de trouver une section du lit du Zaïre très favorable au procédé de construction retenu : assez grande pour que les vitesses n'y soient pas trop élevées, ce qui rendrait la coupure difficile, pas trop grande cependant pour éviter des ouvrages de fermeture prohibitifs.

Le site du barrage devait donc présenter un ensemble rare de caractères topographique et bathymétrique que l'on trouve, cependant, rassemblés à l'emplacement choisi, à la pointe amont de l'île de Sikila.

La Zaïre coule à cet endroit, entre sa rive gauche et l'île de Sikila, dans un lit rocheux large de 350 à 400 m seulement mais profond de 80 à 90 m ; les vitesses y sont donc relativement modérées, de l'ordre de 3 m/s en étiage. Immédiatement en aval, à l'origine des premiers rapides, les parois de la vallée sous-fluviale se rapprochent, améliorant la butée du futur massif d'enrochements.

La ligne de récifs qui émerge en basses eaux, à moins de 200 m de la rive gauche, est une des caractéristiques

qui ont déterminé le choix de la section. En effet, le bras rive gauche, fermé par ces récifs qui forment un seuil naturel parallèle à la berge, jouera pendant la coupure du bras profond du fleuve, le rôle d'une dérivation provisoire complémentaire.

Le bras de Sikila, entre l'île et la berge rive droite, est un autre atout du site. Il permet d'ouvrir une dérivation provisoire importante dans des conditions économiques remarquables, le volume de rocher extrait correspondant sensiblement au remblai du barrage. Cet ouvrage dimensionné pour la crue décennale, $70\,000\text{ m}^3/\text{s}$ environ, sera aménagé par la suite en évacuateur de crues — l'évacuateur n° 1 — capable d'absorber le tiers de la crue du projet.

Enfin, l'implantation du barrage et de la dérivation dégage totalement l'entrée de la Grande Vallée. Celle-ci constitue un vaste canal naturel portant, après la mise en eau, les débits dérivés vers la Bundi et l'usine, tandis que les débits non turbinés retournent au fleuve en se répartissant entre l'évacuateur n° 1 et l'évacuateur n° 2.

Ce dernier ouvrage est situé à l'extrémité aval de la Grande Vallée, sur le col faisant communiquer la vallée de Sikila et celle du fleuve.

Les deux évacuateurs de crue sont capables d'absorber, sous la cote 205 et l'usine de Bundi étant arrêtée, un débit légèrement supérieur à la crue du projet, estimée à $95\,000\text{ m}^3/\text{s}$.

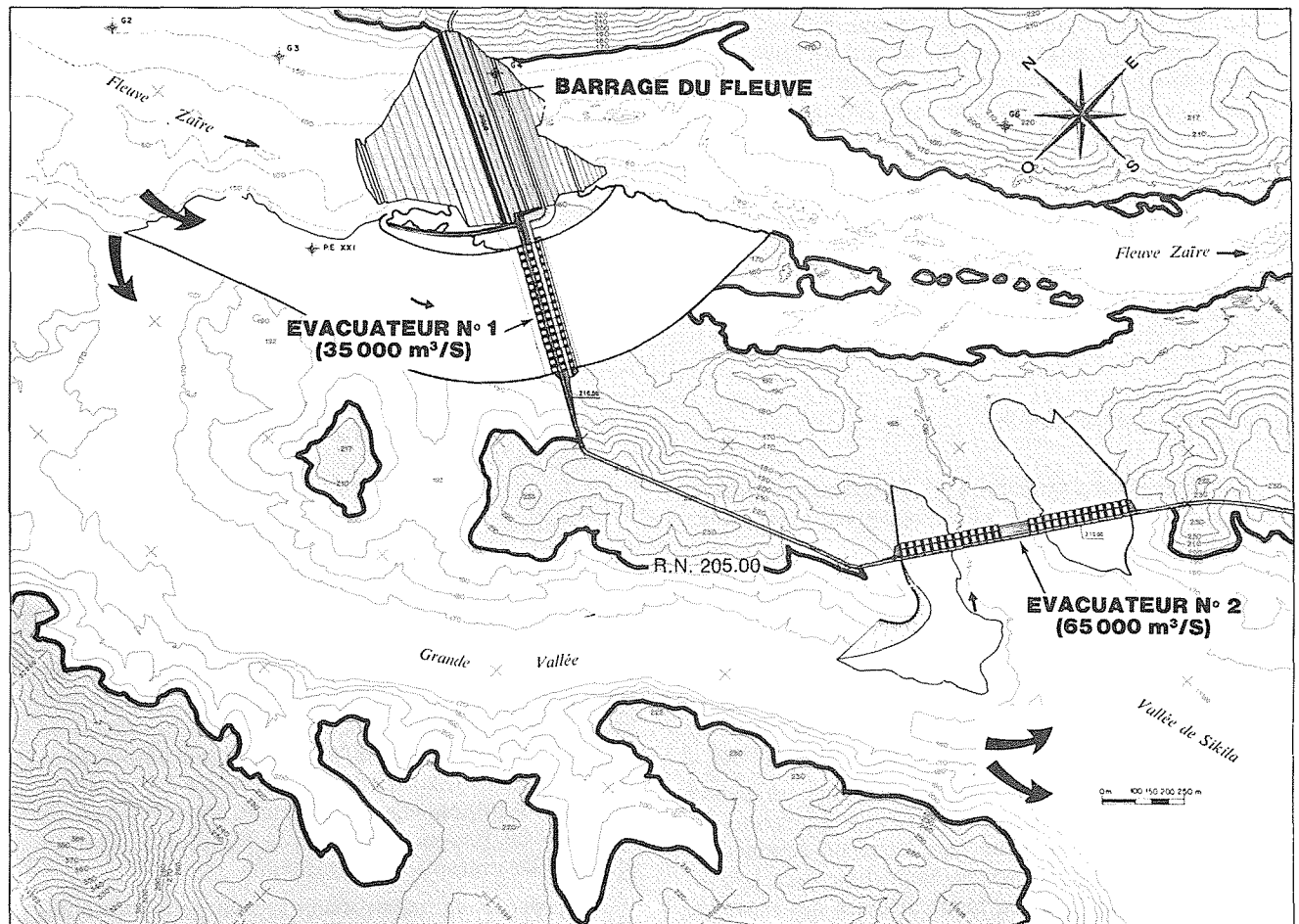


Figure 6 — Grand Inga, ouvrages amont.

Le principe retenu est celui d'une coupure à l'avancement, décomposée en deux opérations principales :

- réaliser la coupure du bras profond du fleuve à l'aide d'un seul massif. Le débit est alors dérivé partiellement à travers les ouvrages de dérivation provisoire et au-dessus du seuil naturel isolant le sillon de la rive gauche du bras principal;
- terminer la coupure au moyen de deux batardeaux construits simultanément : l'un en amont, parallèlement à l'axe des ouvrages, avec un léger décalage vers l'amont ; l'autre en aval sur la crête du seuil naturel. Une synchronisation relative de l'avancement de ces deux batardeaux permet de diviser la dénivellation totale à peu près également au droit des brèches définies par ces batardeaux.

Le poids unitaire des blocs rendant possible la progression d'un massif de coupure à l'avancement est sensiblement proportionnel à la puissance 3 de la chute à couper. Le procédé consistant à construire simultanément deux massifs permet donc de couper des dénivellées importantes avec des blocs dont les difficultés de manipulation restent a priori raisonnables.

Dans le cadre de la solution retenue, la fermeture du sillon principal s'achèverait avec une dénivellée voisine de 5 m et des blocs ayant un poids unitaire de l'ordre de 5 tonnes ; la fermeture du bras rive gauche s'achèverait avec une chute totale de 7 à 8 m, partagée en 2 chutes, et des blocs d'un poids unitaire qui ne dépasserait pas non plus 5 à 6 tonnes.

Les essais sur modèle ont montré, par ailleurs, que la coupure du bras profond est d'autant plus facile que le débit du fleuve est élevé ; elle aura donc lieu en hautes eaux.

Par contre, la fin de la coupure du bras rive gauche est plus facile à réaliser si le débit du Zaïre est faible, le seuil naturel créant alors une perte de charge importante ; elle aura donc lieu en basses eaux.

Au point où en sont actuellement les études, les essais sur modèles réduits aux échelles du 1/100 et du 1/150 ont confirmé la possibilité de réaliser cette coupure en eau vive, et ont permis d'en affiner le programme.

La séquence illustrée par les dernières diapositives se présente avec les meilleures chances de succès :

- La première phase peut être commencée en septembre de la troisième année, soit légèrement avant que la dérivation provisoire ne soit en état de jouer son rôle. La construction par la rive droite à partir de l'île de Sikila présente l'avantage de commencer à obturer le lit du fleuve dans sa section la plus profonde et de réaliser une partie non négligeable de l'ouvrage sans que le niveau amont de l'eau augmente de façon sensible.
- Au cours de cette première phase, la dérivation provisoire étant mise en service, le massif est poursuivi vers la rive gauche par déversement d'encrochements ; des blocs triés, de 1 à 2 tonnes, suffisent. Parallèlement, on amorce en amont, légèrement en retrait de la partie avancée du massif de coupure proprement dit, le complément de recharge avec des matériaux non triés, de poids inférieur à 2 tonnes.

- En seconde phase, les mêmes opérations sont poursuivies ; mais lorsque le massif arrive sur le côté gauche du sillon profond, les essais ont montré que les vitesses de l'eau sont telles qu'il est nécessaire de mettre en place des blocs de 5 à 6 tonnes. En fin de deuxième phase, le sillon profond est coupé et la recharge amont, décalée vers l'amont, présente une largeur de 60 m environ.
- Avec la troisième phase, commence la fermeture du sillon secondaire situé en rive gauche, c'est-à-dire la coupure définitive du lit du Zaïre. Le massif de coupure est scindé en deux massifs qui progressent vers la rive gauche selon deux axes différents : d'une part, suivant la direction de l'ouvrage principal, mais légèrement décalé vers l'amont, ce qui permet, étant donné la configuration du terrain, d'être à l'abri des forts courants et de n'utiliser que des blocs de 1 à 2 tonnes au moins au début ; d'autre part, suivant l'arête centrale, la recharge étant effectuée avec des blocs de 5 à 6 tonnes en raison des vitesses importantes et des conditions d'appui peu favorables existant peut-être pour ces blocs.
- La dénivellée totale est ainsi divisée en deux chutes partielles qui soumettent chaque massif à des vitesses moindres. De ce fait, les deux massifs sont poussés à des cotes différentes : 175 pour l'amont comme pour le massif principal mais 163 seulement pour l'aval.
- En quatrième phase, les opérations sont poursuivies de la même façon, mais les vitesses de l'eau au droit du massif de coupure amont sont telles qu'il devient nécessaire d'utiliser, pour avancer, des blocs de 5 à 6 tonnes.
- En cinquième phase, la progression du massif de coupure sur l'arête centrale se poursuit avec des blocs de 5 à 6 tonnes, tandis que des recharges sont mises en place en aval du massif principal. Ces recharges aval, également en blocs de 5 à 6 tonnes, améliorent les conditions de stabilité à la percolation dans cette étape de coupure et surtout dans la phase finale de construction du barrage.
- En sixième phase, la coupure est achevée avec des blocs de 5 à 6 tonnes. Les essais ont montré que l'avancement d'un massif de coupure de faible volume depuis la rive gauche faciliterait l'opération de fin de coupure.
- La septième phase consiste à placer des recharges aval toujours avec des blocs de 5 à 6 tonnes, pour la raison évoquée en cinquième phase. Simultanément, sont mises en place des recharges amont en blocs non triés, de poids inférieur à 2 tonnes.
- La coupure du bras principal s'achèvera avec des débits relativement forts, donc en décembre ou janvier, et celle du bras rive gauche avec des débits faibles, c'est-à-dire pendant l'étiage en juillet-août.

Une fois la coupure achevée, il restera à transformer le massif initial en ouvrage définitif en le surélevant jusqu'à la cote 210 et en engraisant ses fruits amont et aval. La recharge amont sera réalisée avec des matériaux de granulométrie progressivement décroissante, et s'achèvera par un épais tapis en sable naturel du fleuve,

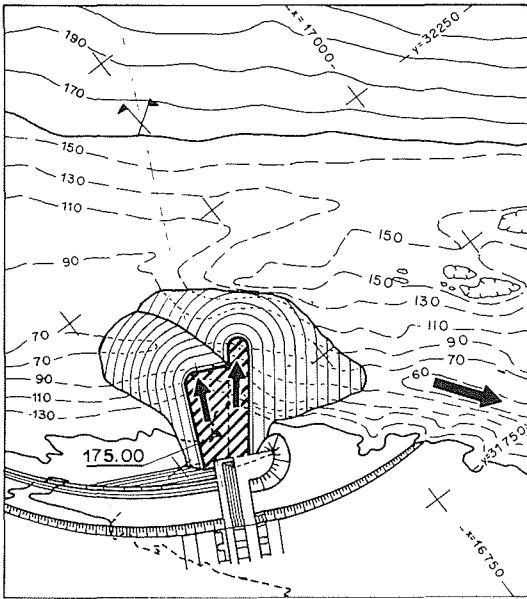


Figure 7 – Coupure du fleuve – 1^{ère} phase.

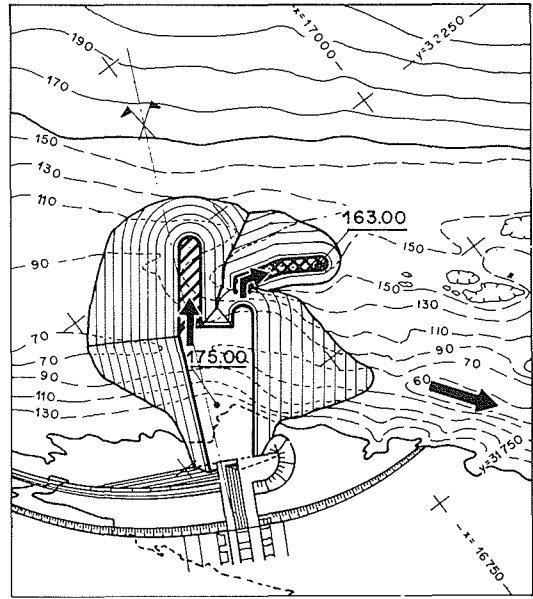


Figure 8 – Coupure du fleuve – 3^e phase.

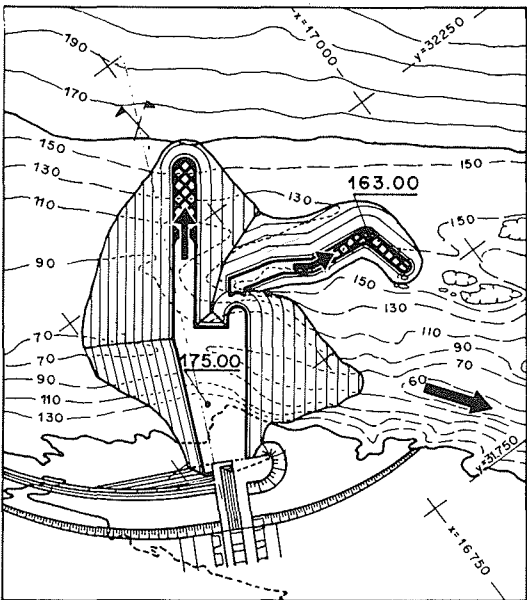


Figure 9 – Coupure du fleuve – 4^e phase.

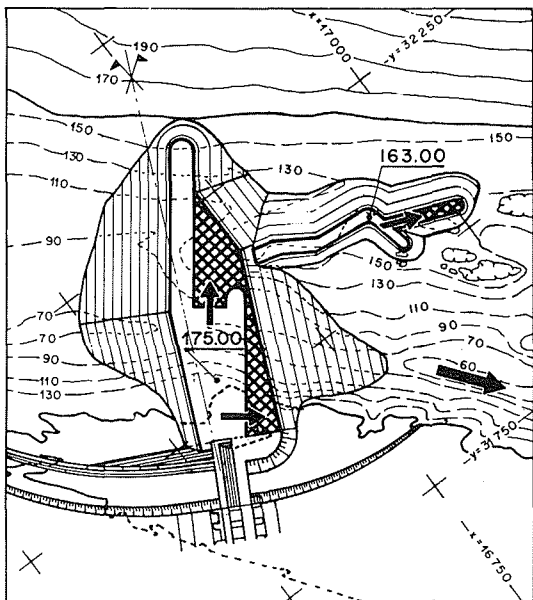


Figure 10 – Coupure du fleuve – 5^e phase.

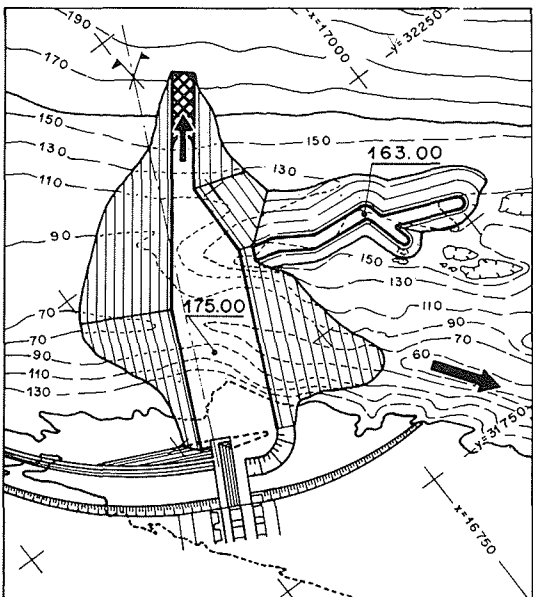


Figure 11 – Coupure du fleuve – 6^e phase.

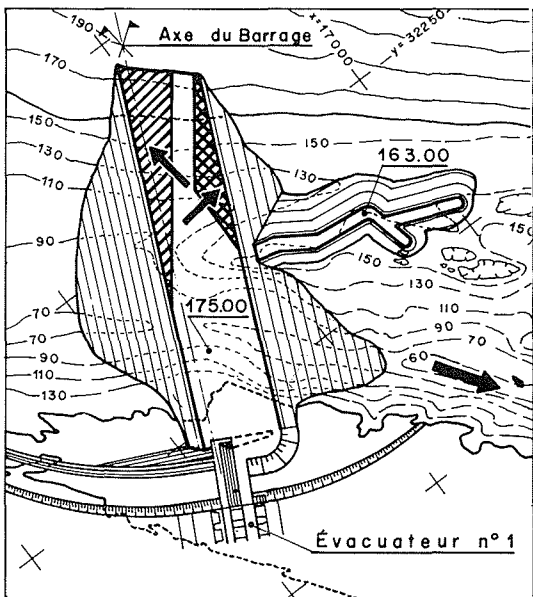


Figure 12 – Coupure du fleuve – 7^e phase.

pour donner au barrage une étanchéité satisfaisante. A l'inverse, la recharge aval sera complétée avec les matériaux les plus gros, pour assurer la stabilité du pied aval.

Des essais effectués dans le cadre d'autres projets ont montré que la mise en place de matériau relativement fin, uniquement par déversement n'était pas possible. On assiste, après un premier placage du matériau dû aux vitesses de percolation, à un entraînement de la totalité du matériau vers la partie basse amont du massif, par un processus analogue à celui des avalanches. Pour résoudre ce problème, il faudra mettre au point un système de mise en place qui minimisera la dispersion des grains : chaland à goulotte, par exemple.

Les ouvrages aval

Les ouvrages aval comprennent : le barrage de la Bundi, la chambre d'eau, les prises d'eau, les conduites forcées et l'usine.

Le projet associe étroitement ces ouvrages entre eux, l'objectif étant que le volume de remblai nécessaire à la construction de l'important barrage de la Bundi soit balancé par le volume total des volumes extraits à la chambre d'eau et aux ouvrages de la chute construits en première étape. Pour éviter les problèmes de stockage

des matériaux, qui deviendraient rapidement inextricables en raison de l'importance des volumes en jeu, les programmes d'exécution de ces ouvrages seront nécessairement très imbriqués.

Il en résulte, en particulier pour le barrage de la Bundi, que la coupe-type de l'ouvrage devra présenter quelques possibilités d'adaptation, et laisser une souplesse suffisante pour autoriser la mise en place, dès leur extraction, des matériaux de qualités diverses à provenir des déblais de la chambre d'eau.

Cette contrainte mise à part — qui conduit à surdimensionner légèrement l'ouvrage — le barrage de la Bundi ne présente d'autre trait saillant que son envergure : 32 millions de mètres cubes. Il ne comporte aucun ouvrage annexe et sa construction ne devrait pas poser de problème particulier.

La chambre d'eau, comme il vient d'être dit, est la carrière du barrage Bundi : en supprimant le relief depuis la cote 180, côté retenue, jusqu'à la cote 180, côté berge du fleuve, on crée une vasque profonde de 25 mètres, en forme de convergent-divergent qui permettra d'alimenter la totalité des groupes à installer.

Les prises d'eau, prévues pour débiter $600 \text{ m}^3/\text{s}$ chacune, sont classiques tant par leur conception que par leur équipement : rainures à batardeau, grilles et vanne de tête de type wagon.

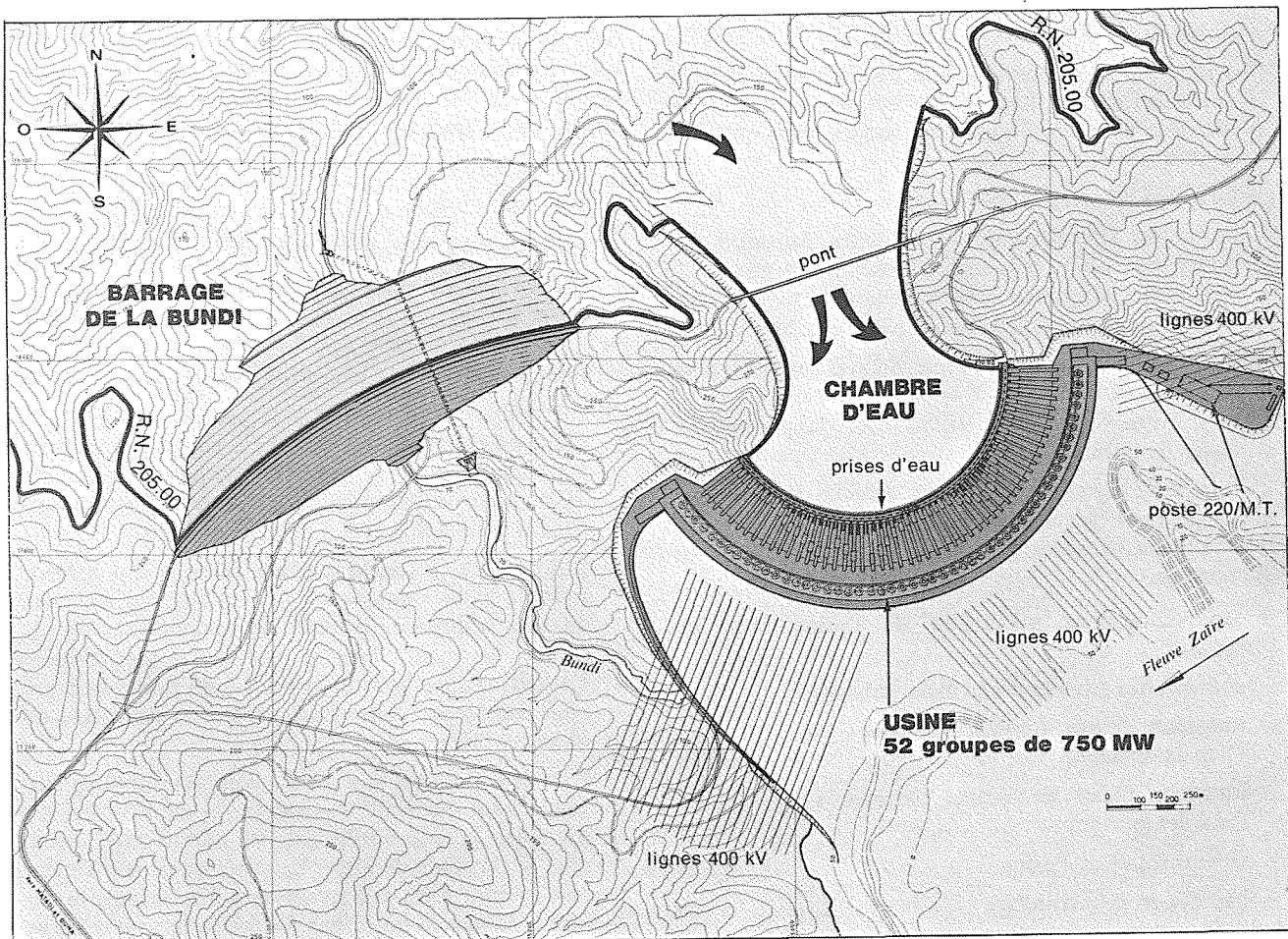


Figure 13 – Grand Inga, ouvrages aval.

Les conduites forcées d'un diamètre de 9,50 m sont rayonnantes, toutes de même longueur; et rectilignes en plan, inclinées à 41° sous l'horizontale; elles dessineront les génératrices d'un vaste tronc de cône, obtenu par des déroctages qui ne deviendront importants que lors de l'installation des derniers groupes.

L'usine, à son stade ultime d'équipement, a toutes chances d'être et de rester définitivement la plus puissante installation hydroélectrique au monde : ses dimensions sont inévitablement assez impressionnantes en valeur absolue.

Cependant, si l'on tient compte de la puissance installée, ces dimensions apparaîtront au contraire extrêmement modestes : les ouvrages de la chute (prise d'eau, conduites forcées, usine) couvriront une surface au sol de 43 hectares, soit une concentration de 900 MW installés à l'hectare, alors qu'il faut compter un minimum de 25 hectares pour installer 900 MW en énergie nucléaire. Le fait que les ouvrages de la chute n'occupent que 4 % de la surface au sol qu'occuperaient les ouvrages nucléaires équivalents est un indice révélateur de l'économie du système.

La structure générale de l'usine devait répondre aux préoccupations suivantes :

- protéger les installations contre les plus hautes eaux aval ;
- éviter l'inondation de toute l'usine en cas d'accident grave et très improbable, survenant sur l'une des turbines ;
- éviter que la grande longueur de l'usine conduise à des manutentions importantes des matériels pour le montage et le démontage des groupes, ainsi qu'à des contraintes de circulation.

Le projet retenu prévoit donc que :

- l'usine est constituée de 13 enceintes identiques dénommées "tranches", abritant chacune 4 groupes ; elles sont juxtaposées mais totalement isolées les unes des autres par un mur s'élevant jusqu'à la cote 80,00 ;
- sur toute la longueur de l'usine, à l'aval des groupes et au-dessus des aspirateurs, règnent une plage de montage et une voie de circulation, desservies par les portiques de l'usine.

Une telle disposition permet d'éviter la plage de montage entre groupes et d'obtenir ainsi la longueur minimum de bâtiment tout en facilitant les opérations de montage.

Les dimensions principales de l'usine sont les suivantes :

— entr'axe des groupes d'une même tranche. . .	32 m
— longueur d'une tranche comptée sur l'axe des groupes	132 m
— longueur totale de l'usine comptée sur l'axe des groupes	1 780 m
— largeur totale de l'usine.	73 m
— hauteur en infrastructure	55 m
— hauteur en superstructure	30 m

L'économie du site d'Inga

Pour apprécier l'intérêt économique de l'équipement d'Inga à ses différentes phases, nous cherchons à le comparer à un équipement hydraulique français bien connu : celui du Rhône en aval de Lyon, en se limitant aux installations les plus importantes, dont le productible atteint ou dépasse le TéraWattheure par an : Bollène+Chateaufort du Rhône + Logis Neuf + Beauchatel+ Bourg-les-Valence + Valabrègues.

Il convient d'exprimer, bien entendu, les investissements en monnaie constante (le franc janvier 1977) et d'y inclure, pour ce qui concerne les projets, les aléas, les frais du Maître de l'ouvrage et les intérêts intercalaires.

Si l'on désigne par I l'investissement au kW installé, et si l'on choisit comme investissement de référence N le coût d'installation en France d'un kW nucléaire (2 100 F) on trouve :

- pour le Rhône. I = 360 % de N
- pour Inga (1 + 2) I = 86 % de N
- pour le Grand Inga : 1^{ère} étape. . . . I = 180 % de N
- et pour chacune des 12 tranches à suivre I = 30 % de N

Si maintenant nous choisissons comme consommation de référence, celle d'une centrale thermique classique (7,7 centimes de fuel par kWh) et que nous désignons par E l'économie de combustible réalisée chaque année par l'aménagement hydraulique, on trouve :

- pour le Rhône. E = 6,3 % de I
- pour Inga (1 + 2) E = 27 % de I
- pour le Grand Inga, 1^{ère} étape E = 16 % de I
- et pour chacune des 12 tranches à suivre E = 95 % de I

Pour schématiser le site d'Inga sur le plan économique, on peut retenir :

- d'une part, que son équipement complet équivaldrait à un ensemble de centrales thermiques consommant 75 millions de T de fuel par an, soit un débit permanent et inépuisable de 2,5 m³/s de pétrole. . .
- d'autre part, qu'après la phase actuelle qui permettrait de livrer l'énergie approximativement au quart du prix européen, la véritable exploitation de cet énorme gisement verra le prix de revient s'élever d'abord aux environs de la moitié du prix européen, pour redescendre très vite à moins du douzième de ce même prix.

Il va de soi qu'une impasse au départ sur un programme aussi lourd que celui du Grand Inga est difficilement imaginable, et que l'opération ne saurait être lancée qu'avec la certitude de placer la puissance de la première tranche (3 000 MW) dès qu'elle sera disponible. On débouche ainsi sur le problème fondamental que pose ce site surprenant : que peut-on faire de cette énergie ? . . .

Aluminium ?

Ce serait une usine de 1 400 000 T d'aluminium par an, soit 10 % de la consommation prévisible du monde occidental en 1982 ; et qui nécessiterait un investissement de l'ordre de 17 à 18 milliards de francs, nettement plus lourd que celui de l'aménagement (10 milliards).

Enrichissement de l'uranium ?

La production annuelle par diffusion gazeuse, serait de 9 millions d'U.T.S. soit 20 % environ des besoins du monde occidental en 1982. L'investissement, de l'ordre de 9 milliards, serait cette fois légèrement inférieur à celui de l'aménagement.

Hydrogène électrolytique ?

La production serait de l'ordre de 350 000 tonnes d'hydrogène par an, ce qui cette fois représenterait à

peine 1,5 % de la production occidentale d'hydrogène en 1982 (étant précisé que l'hydrogène électrolytique entre jusqu'à maintenant pour moins de 1 % dans cette production).

L'investissement pourrait être de l'ordre de 3 à 4 milliards, très inférieur donc à celui de l'aménagement. Mais, d'une part, saurait-on transporter cet hydrogène jusqu'aux centres de consommation ; d'autre part et surtout, si cet hydrogène devait être considéré comme un combustible banal, à 3 centimes la thermie, l'opération deviendrait économiquement inconcevable.

Ces rapides considérations sortent du domaine du projeteur hydraulicien, mais elles débouchent sur les problèmes qui conditionnent la poursuite de l'effort entrepris, problèmes sans aucun doute plus ardues que ceux qui se sont présentés au technicien au cours de l'étude passionnante de ce site exceptionnel . . .

Discussion

Président : M. J. CABANIUS

M. le Président remercie M. FRANCOU qui a brossé un tableau très suggestif des grands projets envisagés et des premières tranches de réalisation. Mais, dit-il, il n'a pas mis assez en évidence la part personnelle qu'il a prise dans cette œuvre magnifique, même si elle est, comme toujours, une œuvre collective. Il faut dire que si M. FRANCOU n'a pas découvert l'énorme énergie potentielle que recèle ce site, il l'a remarquablement exploitée sur le plan conceptuel. Il y avait au départ un certain nombre de projets concernant l'aménagement de la chute d'Inga, mais je crois que le projet étudié par M. FRANCOU, et qu'il vous a exposé sous le nom de Grand Inga, est absolument exceptionnel, parce que la grande production d'énergie qu'il permet (300 milliards de kWh) est obtenue au moyen d'un aménagement d'une très grande simplicité. Je voudrais, en outre, souligner, après M. FRANCOU, que cet aménagement est susceptible d'être réalisé progressivement, et ceci est très important, car il est bien évident que le Grand Inga ne pourra être réalisé que par étapes successives qui se poursuivront peut-être jusqu'au delà de l'an 2000, mais il faut noter que dès la première étape, le prix de revient du kWh est relativement faible.

Je ne m'étendrai pas sur tous les chiffres de rentabilité dont M. FRANCOU nous a parlé et qui donnent toujours lieu à certaines controverses. Il s'agit d'un très bel aménagement, mais certaines considérations font que la réalité est parfois loin de la théorie. C'est sur ce point notamment que j'ouvre, sans plus tarder, la discussion.

Sur une question de M. MISSON, M. FRANCOU précise le mode de réalisation par tranches de l'aménagement : emploi de batardeaux cellulaires provisoires, conception du convergent-divergent en amont de la grande usine, etc.

M. JEANPIERRE (EDF-R.E.A.L.) s'interroge sur les risques que comporte le procédé proposé pour la construction du barrage du Grand Inga.

Sur le Rhin, dit-il, où les barrages de coupure sont construits également à partir de massifs d'enrochements, lancés en eau vive, on n'a pas osé se passer de diverses dispositions complémentaires, notamment un rideau étanche, réalisé après coupure ; or, ces ouvrages créent une dénivelée de 10 m au maximum . . .

Le barrage du Grand Inga atteint 130 m de hauteur et crée entre plans d'eau amont et aval une différence de niveau d'une cinquantaine de mètres. Il est construit sans que l'on puisse avoir accès à la fondation et sans que l'on soit maître de la qualité des remblais mis en place. Il ne comporte pas d'organe d'étanchéité. N'est-ce pas audacieux ? (au point de vue des déformations et des risques de renard au contact avec la fondation notamment).

M. FRANCOU répond :

Le procédé de construction envisagé a été étudié en liaison avec les spécialistes de la SOGREAH et a d'ailleurs, été utilisé dans le passé. L'étanchéité du parement amont est assurée par plusieurs couches de matériaux de granulométrie décroissante mises en place après réalisation du barrage de coupure en enrochements ; au niveau du "sillon", l'emprise de l'ouvrage sur le terrain de fondation atteindra 700 m, et suivant ce trajet de percolation l'on trouvera successivement : 120 m de sable fin, 170 m de filtre organisé, 350 m du massif de coupure (blocs de 1 à 2 tonnes) et 60 m de recharge aval (blocs de 5 à 6 tonnes). Ce sont là des chiffres importants et rassurants vis-à-vis d'une charge d'une cinquantaine de mètres d'eau.

M. BOUVARD (E.N.S. d'Hydraulique, Grenoble) intervient ensuite en ces termes :

A la demande de notre très regretté ami Monsieur Ract-Madoux, M. FRANCOU et moi-même avons établi un rapport sur l'énergie hydraulique pour le compte du Congrès des I.C.F. consacré au transfert des Technologies vers les Pays en voie de développement. Bien entendu, nous n'avons pas manqué de mentionner les problèmes posés par la réalisation d'Inga. Nous avons alors constaté que les problèmes portaient d'éléments techniques pour déboucher sur des problèmes non seulement économiques, mais sociaux de grande envergure, liés à des questions très profondes concernant l'évolution globale du Pays. Où en est l'étude de ces questions ?

Je ne sais ce qu'en pense M. N'ZEZA, répond M. FRANCOU, mais il me semble que les industries utilisatrices de l'énergie d'Inga contribueront progressivement mais puissamment à l'évolution du Pays. Nous avons créé à Inga une bonne dizaine de

milliers d'emplois uniquement pour la construction de l'ouvrage lui-même ; 3 000 à 4 000 de ces travailleurs sont des ouvriers spécialisés qui conduisent les bulldozers, manient des marteaux-perforateurs, etc. Ce n'est là qu'un faible contingent par rapport aux emplois qui seront créés par les industries utilisatrices de l'énergie.

Au terme de l'aménagement d'Inga II, observe M. DINIA (Direction de l'Hydraulique du Maroc), la puissance "excédentaire" sera de l'ordre de 1 000 Mégawatts et cette situation risque de durer 10 ans selon M. FRANCOU ; dans ces conditions, l'investissement correspondant n'a-t-il pas été prématuré ? N'aurait-il pas été plus rentable de fractionner en plusieurs tranches réalisées progressivement "à la demande", l'ensemble d'Inga II.

Lors de la prise de décision, répond M. FRANCOU, l'équipement avait sa raison d'être : il devait être affecté à l'alimentation d'une industrie de l'aluminium à créer sur place ; entre temps, la crise de l'aluminium est survenue... mais les pourparlers pour une telle fourniture pourront être repris un jour qu'il faut souhaiter prochain.

M. N'ZEZA confirme la réponse de M. FRANCOU. On a réalisé, dit-il, une deuxième tranche parce qu'il existait, à ce moment, des projets très concrets pour le placement de la production d'énergie correspondante. Ensuite, le premier objectif a été de fournir de l'énergie à l'une des régions les plus riches

et grosse consommatrice d'électricité, celle du Shaba. A une certaine époque, cette zone importait de l'énergie de la Zambie, mais aux termes du contrat, cette fourniture pouvait cesser au bout de dix ans. A l'expiration du dit contrat, on avait alors le choix entre la réalisation de la dernière usine hydroélectrique aménageable : au Shaba (puissance : 1 200 Mw environ) ou la construction de la première tranche d'Inga II et le transport de l'énergie correspondante au Shaba (ex Katanga) par une ligne de 1 800 km de longueur ; c'est cette dernière solution qui a été choisie. La deuxième tranche de la production était destinée aux usines de fabrication d'aluminium, évoquées par M. FRANCOU ; les contrats de fourniture d'énergie correspondants étaient signés lorsqu'est survenue la crise de l'aluminium qui a tout remis en question. La suspension des travaux d'Inga a alors été envisagée ; mais, les études économiques ont montré l'intérêt de les poursuivre en raison du coût élevé de l'arrêt d'un tel chantier.

Sur une question de M. MISSON, M. N'ZEZA précise que la ligne électrique alimentant le Shaba à partir d'Inga entrera en service en 1978.

M. le Président clôt la discussion en remerciant, à nouveau, M. FRANCOU pour son remarquable exposé et M. N'ZEZA pour les précisions qu'il a apportées. Il se fait l'interprète de tous en souhaitant voir commencer dans un proche avenir les études détaillées, puis les travaux du grand aménagement d'Inga.