

8 BILAN DE L'OFFRE ET DE LA DEMANDE EN EAU – BASES DE LA GIRE

8.1 Bilan de l'offre et de la demande en eau

Sur base des valeurs calculées tout au long de ce travail, nous formulons le bilan de l'offre et la demande en eau, jusqu'à l'année 2026.

L'offre est caractérisée par la capacité d'apport en eau du bassin versant, cet apport, comme il a été expliqué dans le chapitre 4, provient des précipitations (Tableau 6.2) et de l'apport glaciaire (sous-titre 4.5, Apport en eau des glaciers, Tableau 4.4) (dans les bassins où des glaciers sont présents). Bien que cette capacité ne soit pas constante dans le temps, nous considérerons toutefois pour ce bilan, une valeur moyenne associée à une probabilité de 50%. (Tableau 6.2)

La demande est caractérisée par les variables décrites dans le chapitre 7 (population, CJE, couverture de service et pertes lors du processus de potabilisation) (Tableau 7.8). Nous avons calculé pour chaque étape du processus, une demande correspondante. Pour les bilans d'offre et de demande de ce chapitre nous utilisons la demande d'eau au niveau des bassins versants ou des barrages (**Dsources**).

Le bilan de l'offre et de la demande est la mise en rapport des ces deux variables à travers les courbes cumulées (Figure 8.1) En hydrologie cette courbe est dénommée « courbe de Ripple » (*Shahin M. 2007; Villón M. 2002*), elle constitue un outil pour les projets de barrages ou pour le bilan des ressources et des demandes où il existe des structures de régulation (*Villón M. 2002*) comme dans le cas des bassins de Hampaturi Incachaca, Tuni et Milluni.

En employant cette méthode, nous pourrions déterminer le moment où la demande surpassera l'offre.

Pour interpréter les graphiques, on remarque que le point d'intersection des deux courbes est le point d'équilibre entre l'offre et la demande. Une situation de déficit en eau est rencontrée lorsque la courbe de la demande surpasse celle de l'offre. La variation des deux courbes produit plusieurs points d'intersections. On considère qu'il existe un déficit en eau lorsque la demande dépasse nettement l'offre et ne descend plus sous celle-ci.

Dépassement de la capacité de l'usine de traitement d'eau

Pour compléter l'analyse des résultats, nous comparerons également la demande à la sortie de l'usine (**Dout usine**) (Tableau 7.8) avec la capacité de l'usine de traitement. (Tableau 1.2)

Scénarios du bilan d'offre et de demande

Pour déterminer l'importance des variables en jeu dans la gestion tant du côté de la demande que de l'offre en eau, on a procédé à une étude de sensibilité au moyen de 6 scénarios :

1. *Le premier scénario (code 0) correspond à la situation actuelle, ainsi que la projection à l'horizon 2026 selon les tendances actuelles. Cette simulation sera celle de référence ou « situation de base » permettant la comparaison entre les différents scénarios.*
2. *Le second scénario (code 1) simule:*
 - i) *la diminution des précipitations respectivement de 1 et 5% avec pour effet une diminution quasi proportionnelle de l'offre en eau du bassin;*
 - ii) *l'augmentation de la précipitation en 1 et 5%.*
3. *Le troisième scénario (code 2) simule une baisse de l'offre en eau en raison d'un recul glaciaire. Deux situations pour l'horizon 2026 seront envisagées: la disparition totale des glaciers et une réduction de moitié de l'apport glaciaire ;*

4. Le quatrième scénario (code 3) simule une diminution progressive des pertes du réseau de distribution jusqu'en 2026, de 25 et 50% par rapport aux valeurs actuelles ;
5. Le cinquième scénario (code 4) est établi en modifiant le taux initial de croissance de la population (taux de croissance qui décroît avec le temps), cette variation affecte la demande de manière directe :
 - i) en utilisant un taux de croissance constant sur toute la période d'analyse.
 - ii) en utilisant un taux de croissance moyen entre le taux constant et le taux qui décroît avec le temps.
6. Le sixième scénario (code 5) est structuré à partir de l'hypothèse d'une augmentation de la CJE, de 50 et 100%.

En résumé, les scénarios de bilans offre – demande en eau ont été déterminés sur la base des critères suivants:

1. Simulation de la situation dans le cas où chaque variable atteindrait sa valeur maximale ou moyenne, valeurs définies dans les chapitres précédents.
2. Utilisation d'un pas des temps mensuel permettant de déterminer quand le déficit en eau apparaîtra.

Situation de Base

L'offre de la situation de base a été calculée employant les valeurs de précipitation qui ont une probabilité associée de 50% (Tableau 6.2). Cela représente en moyenne une année d'apport. La valeur de l'apport glaciaire a été prise comme un pourcentage de l'apport du bassin en utilisant comme référence l'influence des glaciers estimée dans le chapitre 4 (Tableau 4.4). Ces valeurs sont résumées dans le Tableau 8.1

La demande de la situation de base a été calculée à un rythme mensuel selon les critères présentés dans le chapitre 7. Les valeurs sont présentées dans le Tableau 7.8.

Tableau 8.1 : Valeurs de l'offre pour la situation de base (hm³)

Apport Bassin versant (Q)					
Mois	Tuni	Milluni	Choqueyapu	Incachaca	Hampaturi
janvier	7.13	5.97	2.66	2.58	5.54
février	5.11	4.26	2.23	1.91	4.80
mars	4.76	3.09	2.51	1.29	3.49
Avril	2.87	1.62	1.13	0.38	1.38
Mai	1.46	0.76	0.59	0.14	0.47
Juin	0.70	0.30	0.40	0.04	0.45
Juillet	0.29	0.46	0.41	0.14	0.64
Août	0.31	0.43	0.43	0.31	0.72
Septembre	0.65	0.33	0.50	0.35	0.80
Octobre	1.14	0.57	0.74	0.27	1.00
Novembre	1.98	0.98	0.95	0.26	1.08
Décembre	3.79	2.16	1.44	0.47	1.59
	30.20	20.92	14.01	8.15	21.95
Apport Glacier					
	Tuni	Milluni	Choqueyapu	Incachaca	Hampaturi
	+ 0.11 Q	+ 0.11 Q	0.00	0.00	0.00

Application

Pour le système d'El Alto, tous les scénarios ont été envisagés. Pour Achachicala, les cinquième (code 4) et sixième (code 5) bilans n'ont pas été simulés, en raison des faibles variations démographiques (stagnation ou légère diminution). Pour Pampahasi, le scénario de retrait glaciaire (code 2) n'a pas été envisagé étant donné l'absence de glacier dans le bassin versant source.

Le résumé des scénarios simulés est présenté dans le Tableau 8.2. La Figure 8.1 indique les premiers bilans de chaque système, les autres étant repris dans les Annexes.

Tableau 8.2 : Résumé des paramètres des scénarios de bilan de l'offre et de la demande en eau

No	Code	Offre		Demande					Capacité des usines de traitement d'eau	Apport du bassin dépassé en: (valeur du bilan 2026 [Hm ³])	Date de dépassement (Bilan négatif)	Capacité de UTE dépassé	
		P et Q	Glacier	Pertes Réseau	Population	i	CJE [l/hab-jour]	Couverture				Besoin d'ampliation de capacité en [l/s]	Date de dépassement
Système El Alto (Barrage Tuni)													
1	0-EA-a	T 9.1	+0.11 Q	T 6.8	T 7.2	T 7.2	T 7.4 (A)	T 7.3		-13.16	juil-12		
2	0-EA-b	T 9.1	+0.11 Q	T 6.8	T 7.2	T 7.2	T 7.4 (A)	T 7.3	T 1.2			380	janv-10
3a	1-EA-a1	-1% ; -5%	+0.11 Q	T 6.8	T 7.2	T 7.2	T 7.4 (A)	T 7.3		-13.46; -14.67	juil11 ; janv 10		
3b	1-EA-a2	+1% ; +5%	+0.11 Q	T 6.8	T 7.2	T 7.2	T 7.4 (A)	T 7.3		-12.86; -11.65	juin13 ; juin 16		
4	2-EA-a1	T 9.1	+ 0 Q	T 6.8	T 7.2	T 7.2	T 7.4 (A)	T 7.3		-21.37	mai-12		
5	2-EA-a2	T 9.1	+0.055 Q	T 6.8	T 7.2	T 7.2	T 7.4 (A)	T 7.3		-17.26	mai-12		
6a	3-EA-a1	T 9.1	+0.11 Q	-50%	T 7.2	T 7.2	T 7.4 (A)	T 7.3		-2.26	juin-14		
6b	3-EA-a2	T 9.1	+0.11 Q	-25%	T 7.2	T 7.2	T 7.4 (A)	T 7.3		-7.24	juin-13		
7	3-EA-b	T 9.1	+0.11 Q	-50%	T 7.2	T 7.2	T 7.4 (A)	T 7.3	T 1.2			290	janv-11
8a	4-EA-a1	T 9.1	+0.11 Q	T 6.8	Pop= f{i cte}	4.57%	T 7.4 (A)	T 7.3		-44.98	juin-11		
8b	4-EA-a2	T 9.1	+0.11 Q	T 6.8	Pop= f{i var}	2.25-4.57%	T 7.4 (A)	T 7.3		-27.02	juin-12		
9	4-EA-b	T 9.1	+0.11 Q	T 6.8	Pop= f{i cte}	4.57%	T 7.4 (A)	T 7.3	T 1.2			1454	janv-09
17a	5-EA-a1	T 9.1	+0.11 Q	T 6.8	T 7.2	T 7.2	100	T 7.3		-71.82	juil-10		
17b	5-EA-a2	T 9.1	+0.11 Q	T 6.8	T 7.2	T 7.2	75	T 7.3		-46.32	juil-12		
18	5-EA-b	T 9.1	+0.11 Q	T 6.8	T 7.2	T 7.2	100	T 7.3	T 1.2			2400	janv-09
Système Achachicala (Barrage Milluni, Rivière Choqueyapu)													
10	0-AA-a	T 9.1	+0.11 Q	T 6.8	T 7.2	T 7.2	T 7.4 (A)	T 7.3		*	*		
11	0-AA-b	T 9.1	+0.11 Q	T 6.8	T 7.2	T 7.2	T 7.4 (A)	T 7.3	T 1.2			*	*
12	1-AA-a	-1% ; -5%	+0.11 Q	T 6.8	T 7.2	T 7.2	T 7.4 (A)	T 7.3		*	*		
13	2-AA-a1	T 9.1	+ 0 Q	T 6.8	T 7.2	T 7.2	T 7.4 (A)	T 7.3		-0.4	août-26		
14	2-AA-a2	T 9.1	+0.055 Q	T 6.8	T 7.2	T 7.2	T 7.4 (A)	T 7.3		*	*		
15	3-AA-a	T 9.1	+0.11 Q	-50%	T 7.2	T 7.2	T 7.4 (A)	T 7.3		*	*		
16	3-AA-b	T 9.1	+0.11 Q	-50%	T 7.2	T 7.2	T 7.4 (A)	T 7.3	T 1.2			*	*
Système Pampahasi (Barrages Incachaca et Hampaturi)													
19	0-PP-a	T 9.1	+0.11 Q	T 6.8	T 7.2	T 7.2	T 7.4 (A)	T 7.3		*	*		
20	0-PP-b	T 9.1	+0.11 Q	T 6.8	T 7.2	T 7.2	T 7.4 (A)	T 7.3	T 1.2			*	*
21	1-PP-a	-1% ; -5%	+0.11 Q	T 6.8	T 7.2	T 7.2	T 7.4 (A)	T 7.3		*	*		
22	3-PP-a	T 9.1	+0.11 Q	-50%	T 7.2	T 7.2	T 7.4 (A)	T 7.3		*	*		
23	3-PP-b	T 9.1	+0.11 Q	-50%	T 7.2	T 7.2	T 7.4 (A)	T 7.3	T 1.2			*	*
24	4-PP-a	T 9.1	+0.11 Q	T 6.8	Pop= f{i cte}	1.37%	T 7.4 (A)	T 7.3		-0.2	nov-26		
25	4-PP-b	T 9.1	+0.11 Q	T 6.8	Pop= f{i cte}	1.37%	T 7.4 (A)	T 7.2	T 1.2			80	janv-19
26	5-PP-a	T 9.1	+0.11 Q	T 6.8	T 7.2	T 7.2	180	T 7.3		-11.3	juil-20		
27	5-PP-b	T 9.1	+0.11 Q	T 6.8	T 7.2	T 7.2	180	T 7.3	T 1.2			320	janv-14

Données de base: 2001-2007

Simulation: 2008-2026

* Bilan encore positive

Code de la simulation du bilan (2008-2026)

- 0: Situation actuelle : Calculée dans ce travail
- 1: Diminution de l'apport du bassin à cause de diminution des précipitations
- 2: Diminution de l'apport glacier à l'horizon 2026
- 3: Diminution linéaire de pertes au réseau à l'horizon 2026
- 4: Croissance de la population constante, sans atténuation
- 5: Croissance du BJE progressive jusqu'au 2026

- EA: Système El Alto
- AA: Système Achachicala
- PP: Système Pampahasi

- a: Bilan du besoin en eau, avec les ressources qui arrivent au barrage
- b: Bilan du besoin en eau, avec capacité de l'usine de traitement d'eau

i: Taux de croissance de la population

P et Q: Précipitation et volume d'apport annuel du bassin Prob. 50%

BJE: Besoin journalier en eau

Glacier: Apport du glacier

ST: Sous-titre

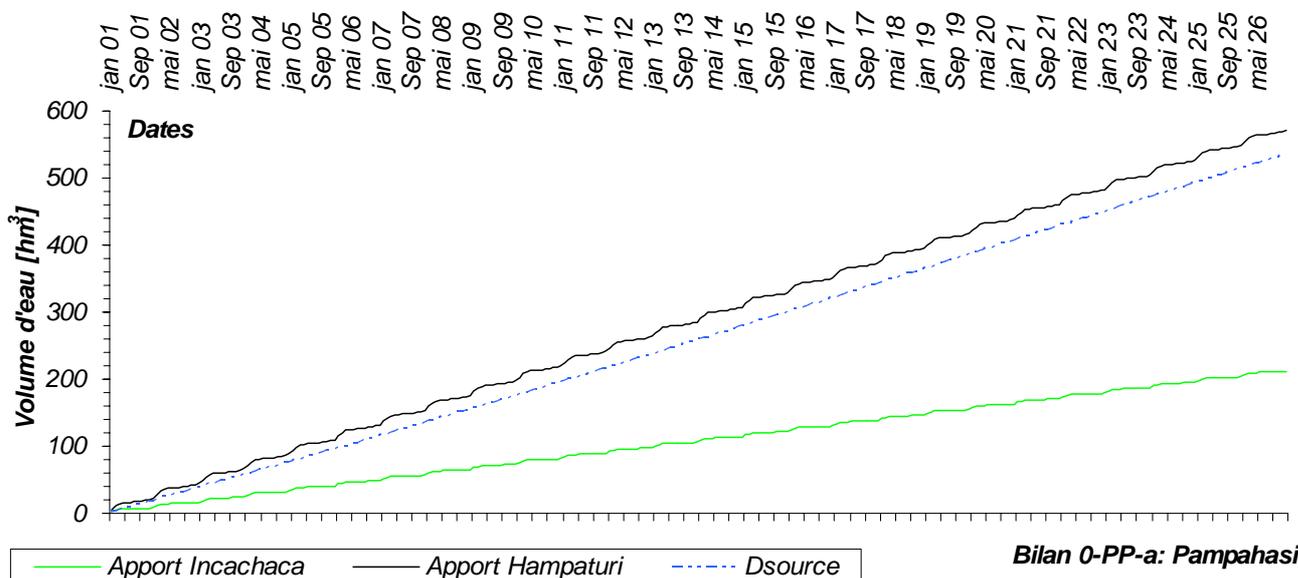
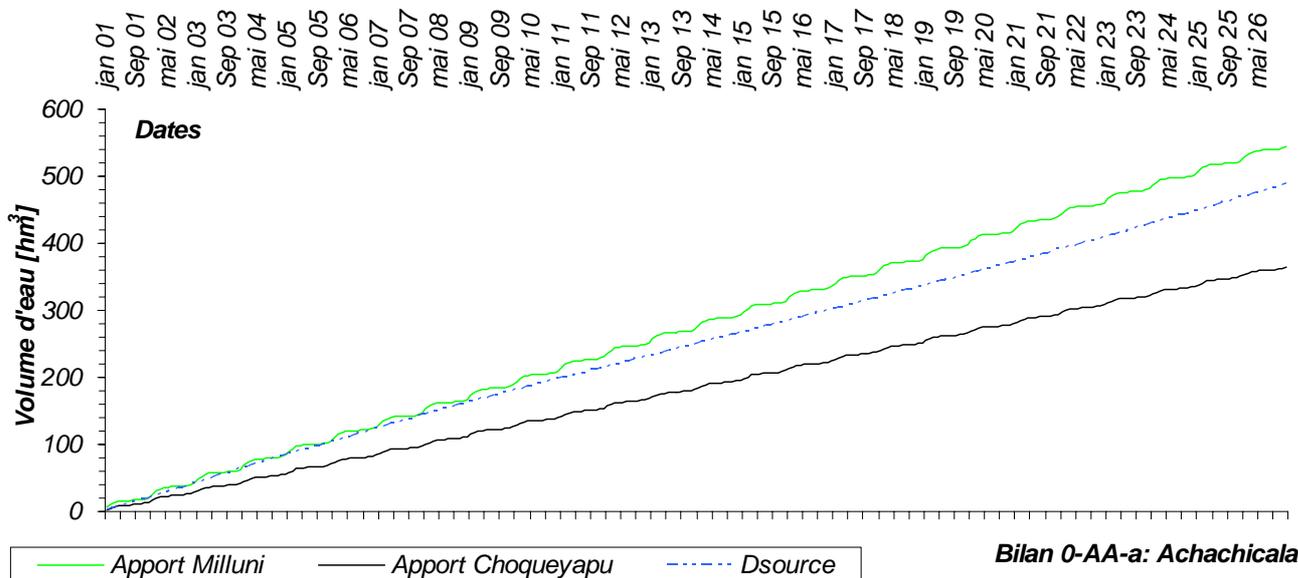
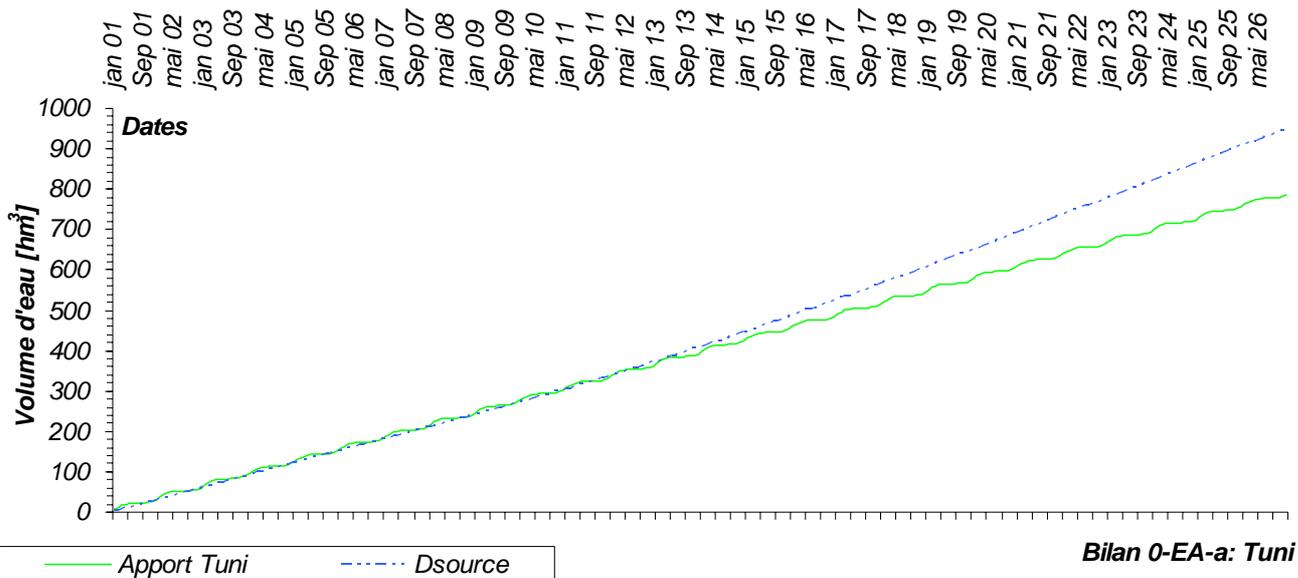
T: Tableau

F: Figure

Barrage: Besoin en source (Barrage et Rivière)

UTE: Usine de traitement d'eau

Figure 8.1 : Bilans de l'offre et de la demande en eau pour les différents systèmes pour la période 2001–2026



Les bilans résumés dans le Tableau 8.2 visent à répondre aux objectifs qui avaient été fixés dans le modèle descriptif présenté au chapitre 2 (Figure 2.10). Nous l'avons intitulé : « conclusions nécessaires pour la mise en œuvre de la GIRE » c'est-à-dire :

- a) **vulnérabilité initiale des systèmes**
- b) « **temps de la gestion** » (dates clés de la gestion) et
- c) **le mode de la gestion.**

Diagnostic des systèmes grâce au bilan entre l'offre et la demande en eau (vulnérabilité initiale)

Comme évoqué plus haut, la simulation du bilan de l'offre et de la demande en eau dans le scénario 0 (Figure 8.1), peut être considéré comme diagnostic de l'état actuel des systèmes et de leur évolution jusqu'en 2026 en supposant que la situation actuelle se maintienne.

Selon nos estimations, El Alto est un système vulnérable, son bilan devenant négatif dès 2010 et 2011. Celui-ci ne devient négatif qu'à partir de Juillet 2012 car les précipitations d'été compensent temporairement la demande pour les deux années précédentes. L'usine de traitement d'eau s'avère déjà insuffisante pour couvrir la totalité de la demande en eau potable du système.

Nous avons commenté ces résultats avec les techniciens d'EPSAS Ils partagent notre analyse des résultats de la simulation (*Communication Personnelle Quisbert T, EPSAS, 2009*).

Le système Achachicala présente une situation qui n'est pas préoccupante : une seule de ses sources (Milluni) suffit pour couvrir la demande de son système. Les eaux de la rivière Choqueyapu servent également d'apport en eau pour le bassin.

La demande du système Pampahasi peut être couverte par l'une de ses sources: Hampaturi, les eaux du bassin voisin d'Incachaca étant également disponibles. Bien que sa demande soit croissante, ses sources peuvent couvrir sans problème la demande jusqu'en 2026.

En résumé, El Alto constitue un système vulnérable tandis que les deux autres possèdent des ressources suffisantes pour répondre à l'évolution de la demande jusqu'en 2026.

Temps de la Gestion

Les résultats concernant le temps de la gestion sont présentés ci-dessous:

El Alto qui est un système déjà vulnérable nécessitant des mesures d'urgence résoudre son problème de déficit. Les prises de décision, ainsi que la mise en œuvre des infrastructures devront prendre cours entre 2010 et 2012. Toutefois, comme la gestion administrative de ces décisions est un long processus, nous pouvons déjà affirmer que nous sommes en retard pour agir. Il faudra donc trouver d'autres solutions alternatives et d'urgence.

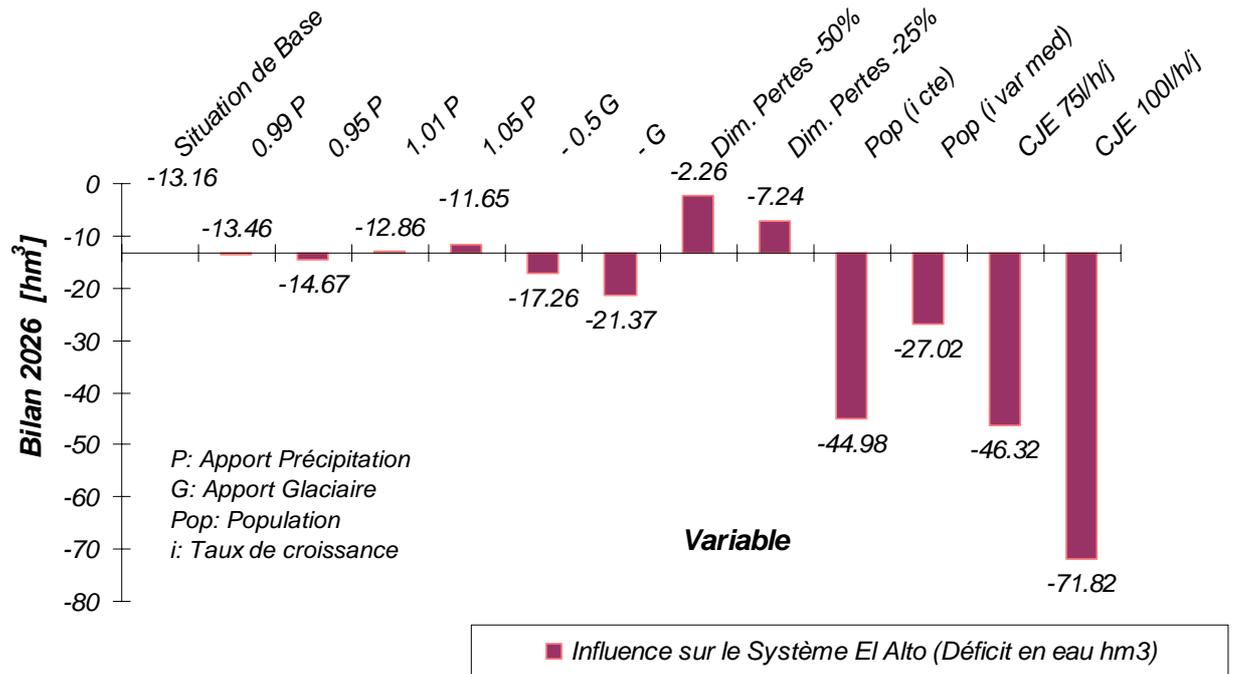
En ce qui concerne le système Achachicala, seule une fonte accélérée de ses glaciers jusqu'en 2026 pourrait conduire à un bilan négatif pour l'année 2026. Même dans l'éventualité d'un recul important des glaciers du système, l'apport en eau provenant du Choqueyapu permettrait de pourvoir la demande.

Dans le système Pampahasi, si la croissance de la population se maintient, la demande en eau pourrait dépasser l'offre en 2026. Le même problème se poserait en cas d'accroissement de la CJE. Si ces deux derniers paramètres manifestaient une augmentation, les dates limites seraient dépendantes de l'ampleur de leur augmentation.

Influence de chaque variable sur le bilan d'offre et de demande en eau

Considérant le système d'El Alto et sa situation de vulnérabilité actuelle comme référence par rapport aux autres scénarios de bilan d'offre et de demande simulés, il est possible de déterminer l'influence de chacune des variables en jeu. Figure 8.2.

Figure 8.2 : Estimation de l'influence de chaque variable sur le bilan de l'offre et de la demande (Bilan pour l'année 2026)



La Figure 8.2 traduit l'influence relative de chaque variable par rapport au bilan prévu pour l'année 2026. La situation de base rapporte un déficit de -13.16 hm^3 pour cet horizon. Nous prenons cette situation comme base de comparaison avec les autres scénarios (axe d'abscisses fixé en -13.16 hm^3), en remarquant les aspects suivants :

Tous les résultats des bilans sont négatifs, ce qui veut dire que tous les scénarios conduisent à un déficit dans le système d'El Alto.

Les valeurs estimées représenteraient ainsi le volume en eau d'apport que le système d'El Alto devra chercher en dehors de ses sources actuelles pour couvrir la demande de la population en 2026, selon les conditions simulées dans chaque scénario.

La diminution de pertes constitue un scénario positif. Elle conduit à une atténuation du déficit.

Dans une moindre mesure, une augmentation des précipitations aura un effet positif sur la réduction du déficit.

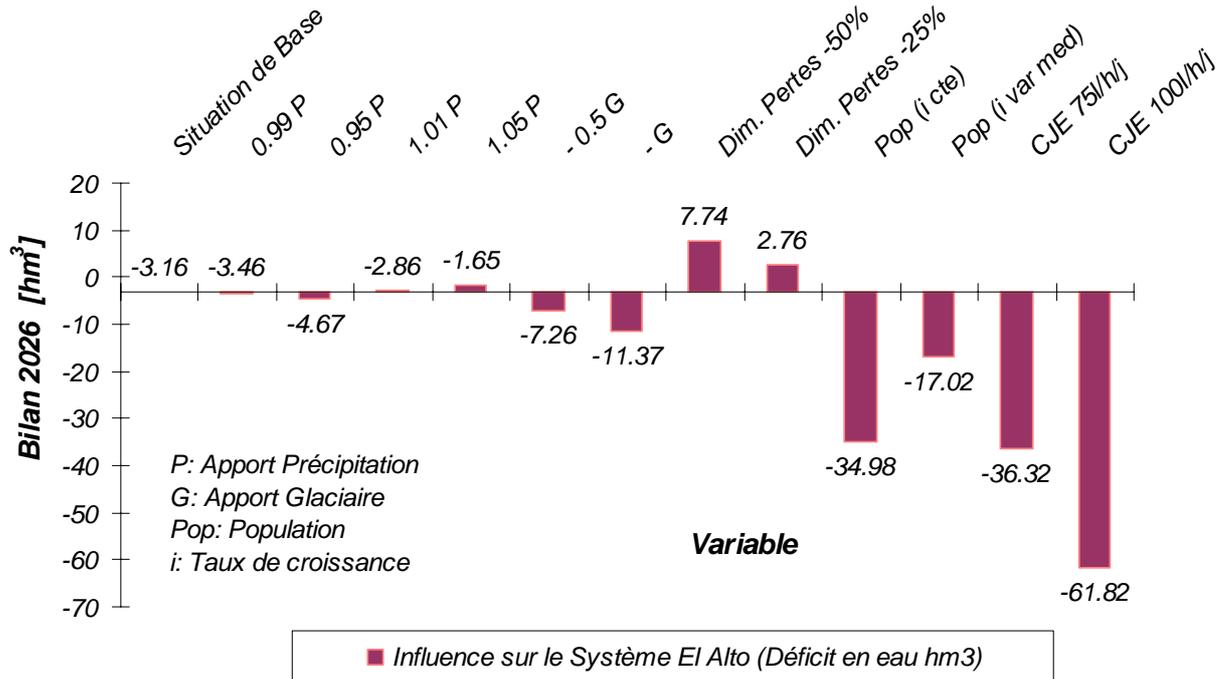
Les scénarios démographiques (croissance de la population sans atténuation ou légèrement atténuée et augmentation de la consommation en eau de la population, CJE), se présentent comme les plus négatifs pour la gestion de l'eau.

La diminution des précipitations de 1 et 5% exprime aussi des scénarios négatifs par rapport aux tendances actuelles. Cependant, par rapport aux autres variables son influence est moindre.

Nous rappelons que pour notre zone à la figure 4.15, nous avons montré que, par rapport à la diminution de l'écoulement, une diminution de 1% des précipitations est équivalente à une augmentation de $2.5 \cdot C$ de la température.

Bien que la capacité d'apport de l'aquifère soit encore inconnue, l'EPSAS ambitionne de prélever environ $10 \text{ hm}^3/\text{an}$ d'eau d'origine souterraine supplémentaires grâce aux projets en développement (**Quisbert 2010, Communication personnel**). En tenant compte de cette donnée, les résultats exposés dans la Figure 8.2 pourraient prendre la forme suivante :

Figure 8.3 : Scenarios de bilan d'offre et demande d'eau d'El Alto en tenant en compte un possible apport de la nappe



Notons que ce possible apport des nappes ne suffira pas à renverser la tendance au déficit en eau à El Alto, même dans les cas d'une augmentation de la précipitation.

La Figure 8.3 dénote que, pour atteindre une situation d'équilibre entre offre et demande, le développement de nouvelles sources (comme l'eau souterraine) devra être combiné à une réduction des pertes au cours du processus de traitement de l'eau.

Dans le cadre des situations présentées ci-dessus, les variables sont classées par ordre croissant selon leur influence sur le bilan dans notre zone d'étude :

1. Pertes dans le processus de traitement d'eau (des barrages jusqu'au réseau)
2. Influence démographique sur la consommation d'eau (Augmentation de la population ou de la CJE).
3. Recul des glaciers
4. Diminution des précipitations (scénario climatique)

Nous situons les pertes en tête de la liste car elles constituent une variable clé pour diminuer le déficit en eau, et représentent donc une clé stratégique pour la gestion de l'eau. Un meilleur contrôle de celles-ci offrirait un sursis pour résoudre de manière structurelle le problème d'eau que connaîtra la population d'El Alto.

Par rapport aux valeurs calculées, les scénarios démographiques sont sans doute les plus importants.

Il est également évident que la priorité pour El Alto consisterait à découvrir de nouvelles sources. Nous considérons que les scénarios présentés montrent l'ensemble des valeurs probables pour El Alto vers 2026.

Le mode la gestion

Le mode de la gestion est le résultat de la prise en considération :

- a) *des aspects actuels de vulnérabilité ou de suffisance des systèmes d'eau potable*
- b) *de la disponibilité des ressources*
- c) *de la vision holistique posée par la GIRE et proposée dans cette recherche*
- d) *de l'importance relative de chaque variable dans la gestion.*
- e) *des temps de la gestion*
- f) *de l'infrastructure qui peut être proposée*

Les 4 premiers aspects sont considérés dans l'analyse présentée ci-dessous et tout au long de cette étude.

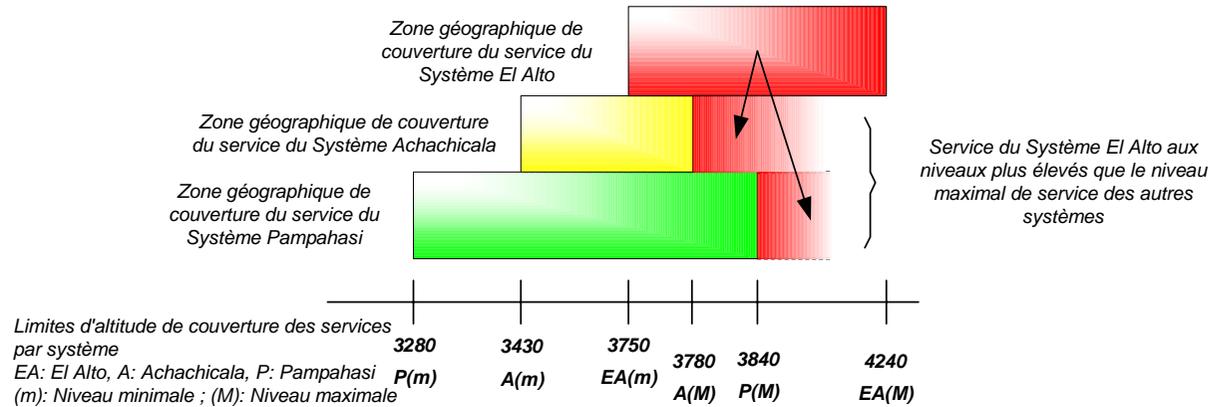
Les **temps de la gestion** dépendent des décisions de l'EPSAS en relation aux aspects de vulnérabilité que nous avons identifiés grâce à l'analyse de bilan d'offre et demande et aussi des infrastructures à prévoir pour diminuer la vulnérabilité de leurs systèmes particulièrement celle d'El Alto. (*Voir Tableau 8.2, colonne « date de dépassement »*).

La Figure 8.4 offre une proposition de mise en œuvre de la gestion en fonction de **l'infrastructure nécessaire** dans le but:

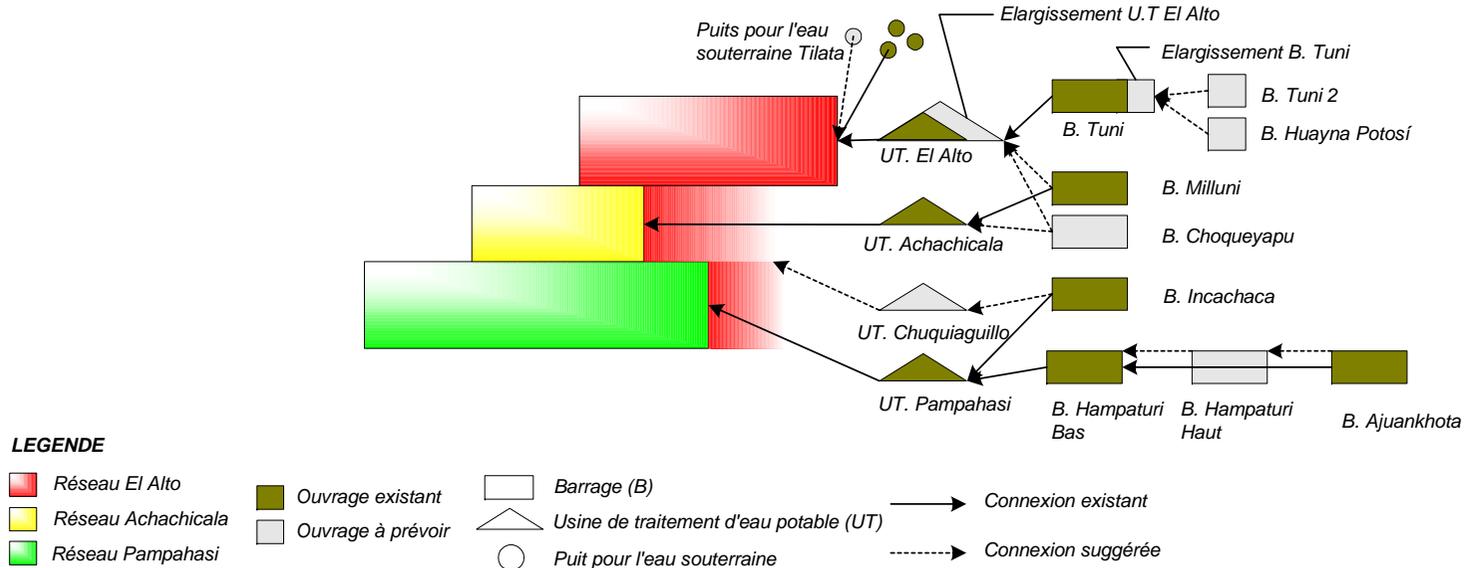
- *de résoudre le problème d'El Alto où la demande en eau surpasse l'offre ;*
- *d'assurer le service futur dans les trois systèmes considérés ;*
- *de diminuer la vulnérabilité de tous les systèmes en les interconnectant.*

Figure 8.4 : Proposition de mise en œuvre de la gestion en fonction de l'infrastructure nécessaire

A) SCHÉMA DE SERVICE D'EAU POTABLE PAR ALTITUDE:



B) SCHÉMA DE SERVICE D'EAU POTABLE EN FONCTION DE L'INFRASTRUCTURE EXISTENTE ET SUPPLEMENTAIRE A PREVOIR



Puits pour l'eau souterraine: la mise en service de nouveaux puits de captage d'eau souterraine est dépendante de la prospection sur l'aquifère d'El Alto.

Agrandissement de l'usine d'El Alto: Comme il a été évoqué plus haut, il est nécessaire d'augmenter la capacité de l'usine de traitement d'El Alto afin de couvrir la demande en eau de la ville. Une modification du schéma de traitement de l'usine serait également bénéfique pour que l'usine puisse recevoir les eaux du barrage Milluni. En raison de la charge solide importante de ces eaux, il conviendrait néanmoins de prévoir une étape de sédimentation plus avancée qu'actuellement dans le processus de traitement de l'eau.

Augmentation de la capacité du Barrage Tuni: elle serait possible au regard de la topographie du lieu d'implantation du barrage en forme de cuvette. Sa capacité de régulation augmenterait car il pourrait stocker une réserve d'eau plus importante pendant les années pluvieuses.

Barrage Huayna Potosí: on suggère la construction de ce barrage en amont du barrage Tuni sur le bassin Huayna Potosí et non parallèlement comme il a été proposé dans le projet. De cette façon, les barrages assumeront une partie du rôle de régulation que les glaciers jouent actuellement, celui-ci ayant tendance à disparaître à cause de la fonte des réserves glaciaires

Barrage Tuni 2: la construction d'un petit barrage en amont du barrage Tuni sur le bassin de Tuni, serait souhaitable. Elle se justifierait de la même manière que celle du barrage Huayna Potosí.

Barrage Choqueyapu: il serait construit dans le bassin du même nom et desservirait les usines d'El Alto et Achachicala. Conjointement avec Milluni, les deux barrages serviraient aux usines de traitement afin : a) d'assurer un plus grand apport en eau, b) d'offrir une plus grande capacité de régulation des apports et, c) d'augmenter la résilience entre ces deux systèmes.

Usine de traitement d'eau de Chuquiaguillo: elle serait construite en aval du barrage d'Incachaca et traiterait les eaux provenant de ce barrage. On profiterait de l'alimentation du système Pampahasi par les eaux provenant du barrage d'Hampaturi, pour permettre à l'usine de Chuquiaguillo de desservir certaines zones situées au-dessus de la limite d'altitude de service du système Pampahasi. Cela soulagerait l'usine de traitement d'El Alto (qui rend actuellement ce service).

Barrage Hampaturi haut : il serait construit entre les barrages d'Hampaturi (en bas) et Ajuankhota, dans le but de profiter de la totalité de l'apport du bassin et d'améliorer d'environ 100% la régulation de l'apport de son bassin via une augmentation des réserves en eau accumulées essentiellement durant les années pluvieuses.

Plan de diminution de pertes : cet aspect est primordial afin d'améliorer l'efficacité des systèmes. Son importance sur le bilan en eau a été suggérée plus haut (Figure 8.2)

Les extensions du réseau correspondent à l'interaction entre EPSAS et les demandes de la population, qui sont implicites dans les projections de la demande.

8.2 Bases de la GIRE

A travers les analyses et estimations qu'elle présente, cette thèse contribue à établir les bases de la GIRE des villes de La Paz et El Alto dans les cadres suivants :

- *évaluation des ressources hydriques*
- *création et suggestions d'instruments de gestion*
- *planification de la GIRE*
 - *planification stratégique globale*
 - *plan d'infrastructure nécessaire*
 - *planification du temps*
- *gestion de la demande*
- *résolution des conflits*

8.2.1 Évaluation des ressources hydriques : Création et suggestions d'instruments de gestion

Ces deux aspects sont analysés ensemble puisqu'ils résultent tous les deux d'études effectuées au long de cette recherche. Alors dans ce cadre, on procède à une récapitulation structurée de ces analyses.

Cette récapitulation est une synthèse de la contribution de cette thèse à la construction de la GIRE. Elle tient compte des connaissances approfondies dans le cadre de cette thèse sur l'apport en eau des bassins versants, des instruments créés pour contribuer à la gestion et de l'analyse des variables représentatives de l'offre et de la demande en eau potable à La Paz et à El Alto.

Ressources en eau disponible actuellement:

Les valeurs moyennes d'apport des bassins versants, des précipitations et de l'écoulement ont été calculées précédemment (Analyse des variables dans les Chapitres 3 et 4 et les valeurs de P et E associées à une probabilité sont dans Tableau 6.2).

Perspective d'évolution des ressources :

- *Quantité de précipitations* → Perspectives ambiguës d'augmentation ou diminution, (+/-5%) (Chapitre 3).

Afin de déterminer les conséquences les plus négatives pour la gestion, une diminution des précipitations (-1 et -5%) a été envisagée plus haut dans un scénario de bilan d'offre et de demande.

- *Quantité de précipitation nécessaire pour répondre aux besoins en eau des systèmes d'eau potable de La Paz et El Alto* → (Tableau 3.5).
- *Retrait des glaciers* → les glaciers représentent entre 8-11% du volume total d'apport en eau des bassins de Tuni, Condoriri, Huayna Potosi (Système El Alto) et Miilluni (Système d'Achachicala) (Tableau 4.4 : G_o/ToT). Le stock glaciaire et son apport vont progressivement diminuer. (Chapitres 4 et 5)

Un scénario du bilan de l'offre et de la demande en eau, a été considéré à partir de deux situations : a) La perte de tout l'apport glaciaire à l'horizon 2026 et b) la perte de la moitié de l'apport glaciaire à l'horizon 2026

Outils pour la gestion de l'eau et pour la prise de décisions portant sur l'utilisation des ressources en eau et l'opération des barrages

- *Courbe de décharge* : méthode suggérée pour déterminer la concentration de précipitations et son délai d'arrivée (Chapitre 3). Il s'agit d'un outil pour l'analyse de l'influence de la concentration des précipitations sur la gestion de l'eau et des années particulières dont la concentration en pluies a joué un rôle sur l'apport du bassin versant.

- *Estimation des précipitations* : méthode suggérée pour estimer la valeur des précipitations totales annuelles qui, conjointement avec le calcul de la quantité de précipitations nécessaires, constitue un outil pour la prise des décisions portant sur l'opération des barrages (Chapitre 3).
- *Balance Hydrologique* : méthode suggérée permettant de décrire la dynamique du bassin versant et de modéliser ses apports en termes d'écoulement et de volume total des ressources disponibles. (Chapitre 4).
Cette méthode nous a permis de déterminer l'apport glaciaire pour les bassins versants

Demandes en eau provenant de la consommation en eau de la population

- *Quantité d'eau du bassin versant nécessaire à la base pour qu'un litre d'eau parvienne au réseau (étant donné l'efficacité des systèmes, Tableau 6.8)*
- *Estimation des quantités d'eau demandées dans les différentes étapes de potabilisation de l'eau pour les 3 systèmes d'eau potable de La Paz et d'El Alto (Tableau 7.8 et Figure 7.6, 7.7 et 7.8).*

On a mentionné les contraintes existantes concernant les sources potentielles.

Dans le cas des eaux souterraines, il existe des contraintes relatives au manque de connaissance concernant la capacité de l'aquifère et son régime. Malgré à cela, l'EPSAS a prévu une possible exploitation de l'aquifère additionnelle à ce sous système Tilata de 10 hm³ de plus.

Dans le cas de l'eau superficielle, les contraintes proviennent de la gestion sociale, politique et des conflits potentiels entre ville et campagne liés à l'utilisation des ressources en eau. D'une part, on trouve les habitants de la campagne (communautés défavorisées et autres en développement) vivant au sein du bassin versant où sont localisées les ressources en eau et qui voient dans l'eau une possibilité de développement et, d'autre part, la population des villes qui a également besoin de cette ressource. (Chapitre 1).

Nous avons également mentionné la sensibilité des citoyens boliviens concernant les décisions liées à l'eau. Ils ont des droits protégés par la loi bolivienne.

Par ces aspects, nous insistons sur l'importance de la variable sociale sur les décisions concernant l'eau et sa gestion.

Outils pour l'opération des barrages

- proposition d'utilisation du concept de temps de résidence comme outil pour l'opération des barrages, par rapport à la demande (sous-titre 6.1).
- utilisation du concept de temps de résidence pour diagnostiquer la capacité de régulation actuelle de nos barrages. (Figure 6.2)

Détermination de l'efficacité des systèmes

L'efficacité se concrétise grâce à

- l'estimation des pertes entre barrages et usines de traitement de l'eau (Tableaux 6.5)
- l'estimation des pertes à l'intérieur de l'usine de traitement (Tableaux 6.6)
- l'estimation des pertes au sein des réseaux. (Tableaux 6.7)
- la détermination de l'efficacité totale de chaque système. (Tableau 6.8)

Détermination du besoin supplémentaire de capacité de mobilisation de l'eau

On propose l'établissement de bilans d'offre et de demande en eau comme méthodologie pour déterminer la nécessité de multiplier les capacités techniques de mobilisation de l'eau disponible actuellement, principalement pour des barrages et des usines de traitement. (Tableau 8.2, Figure 8.1, Annexe).

- Barrages: bilan entre offre des ressources du bassin versant et demande en source (**Dsources**) pour satisfaire la consommation en eau des villes.
- Usines de traitement d'eau: mise en rapport de la demande de traitement en eau nécessaire pour satisfaire la consommation des villes (**Dout_usines**) avec la capacité de production d'eau potable de l'usine de traitement d'eau.

Planification préliminaire du besoin supplémentaire de capacité de mobilisation de l'eau

En concordance avec le dernier point, on suggère également le type d'élément d'infrastructure nécessaire pour créer une gestion de l'eau intégrée couvrant les besoins de tous les systèmes considérés, y compris les besoins actuels urgents en eau d'El Alto. Cette proposition vise à :

- résoudre le problème d'El Alto où la demande en eau surpasse l'offre ;
- assurer le service futur dans les trois systèmes considérés ;
- diminuer la vulnérabilité de tous les systèmes en les interconnectant. (Figure 8.4)

Influence des éléments d'infrastructure au sein des bassins

On a montré que l'agencement des différents éléments d'infrastructure dans les bassins versants est important pour optimiser l'exploitation des ressources, le traitement et la distribution de l'eau et donc maximiser l'apport en eau.

Les barrages pourraient jouer le rôle régulateur des glaciers (*mais pas leur rôle dans l'apport d'eau au bassin*) dans le cas où ceux-ci auraient disparu (Chapitre 4). Dans le nouveau schéma d'infrastructure, on propose la construction de deux barrages (Tuni 2 et Huayna Potosí) pour pallier à la diminution du pouvoir régulateur des glaciers. (Figure 8.4).

Population

On a présenté les taux de croissance de population pour chaque système et les incertitudes introduites dans le calcul à partir de l'hypothèse d'un taux de croissance donné ou d'un modèle de projection de population. (Sous-titre 7.2). On a estimé l'évolution de la croissance de la population de manière indépendante dans chaque système et on a pu démontrer que la croissance est hétérogène entre ceux-ci. (Figure 7.1). Cet aspect d'hétérogénéité de la croissance de la population rend également compte de l'hétérogénéité de la population et des quartiers de l'agglomération urbaine de La Paz et d'El Alto.

Couverture du service d'eau potable

Cette variable dépend de l'administrateur/gestionnaire du réseau d'eau et des demandes de consommation au réseau venant de la population. Nous avons présenté ses projections (Sous-titre 7.3)

CJE

Nous avons proposé une méthodologie de détermination de la CJE au moyen d'une analyse prenant en compte la globalité du processus de potabilisation de l'eau (Sous-titre 7.4)

Par ailleurs, l'estimation de la CJE et de la consommation domestique par personne a été réalisée pour chaque système. Nous avons comparé ces valeurs entre systèmes et avec les consommations de la même nature des autres pays. Cela nous a permis de mettre en évidence une forte hétérogénéité des consommations existantes dans l'agglomération urbaine La Paz - El Alto. (Sous-titre 7.4)

Demande en eau de chaque système

Elle a été estimée pour les différentes étapes du processus de potabilisation de l'eau (sous-titre 7.5, Tableau 7.8).

Sensibilité de la consommation totale et de la demande aux différentes variables considérées

Nous avons déterminé la vulnérabilité actuelle des systèmes de provision d'eau potable par rapport aux valeurs de la demande en eau de la population. Tableau 8.2, Figure 8.1, Annexe).

L'influence des différentes variables sur la consommation en eau et le bilan d'offre et de demande (Figure 8.2) a été analysée en établissant leurs importances relatives dans la gestion de l'eau.

Analyse et Identification de l'importance relative des variables jouant un rôle dans la gestion de l'eau

Nous avons fait une analyse comparative des variables par rapport à leur importance relative dans la gestion de l'eau (Chapitre 8, sous-titre 8.1).

On a mis en rapport les variables de type climatique (précipitation et apport glaciaire) avec des variables de type social comme l'augmentation de la population et de la consommation d'eau (totale et par habitant).

D'autres variables ont également été prises en compte comme les pertes du réseau inhérentes à l'efficacité de l'infrastructure.

Dans nos cas particuliers, nous remarquons l'importance des variables sociales et de la diminution des pertes par rapport aux variables climatiques. Ceci va à l'encontre de la pensée dominante en Bolivie qui stipule que les problèmes d'eau de La Paz et El Alto sont liés aux changements climatiques (diminution de l'apport glaciaire ou des précipitations).

Variables qui devront être analysées prioritairement dans la gestion de l'eau de La Paz et d'El Alto

Nous avons remarqué que la diminution des pertes et la mise en place d'une stratégie qui tient compte du côté social de la demande en eau (croissance de la population et augmentation de sa consommation) sont absolument nécessaires pour parvenir à une meilleure gestion de l'eau de notre zone d'étude.

Les variables climatiques sont importantes pour la disponibilité en eau. Dans une société toujours plus consommatrice d'eau, il est nécessaire d'en tenir compte dans nos bilan.

8.2.2 Planification de la GIRE

A partir des résultats obtenus du bilan d'offre et de demande (sous-titre 8.1), cette thèse apporte sa contribution à trois volets de la planification de la GIRE,

Planification stratégique: elle répond aux politiques de développement régional et national. Les conflits ville-campagne concernant l'utilisation de l'eau trouveraient leur origine dans un manque de planification stratégique entre régions et dans une mauvaise utilisation des instruments de planification. Nous présentons dans la Figure 8.5 une proposition d'utilisation de ces instruments pour la planification de la GIRE et la résolution des conflits.

Pour analyser cette proposition, il est important de signaler qu'il existe en Bolivie trois instruments de planification concernant la thématique de l'eau, la gestion des ressources et la planification stratégique (Bolivie R. d. et al. 2006; Ley No 1551: Participación Popular, 1993; République de Bolivie, 2009)

- **Le Plan d'aménagement du territoire : Niveau national, départemental et municipal (PAT)**

Ce plan présente la vision de développement et les priorités de l'état, du département ou de la municipalité. Il tient compte du niveau social et économique de ses habitants afin de leur offrir des options de développement réelles.

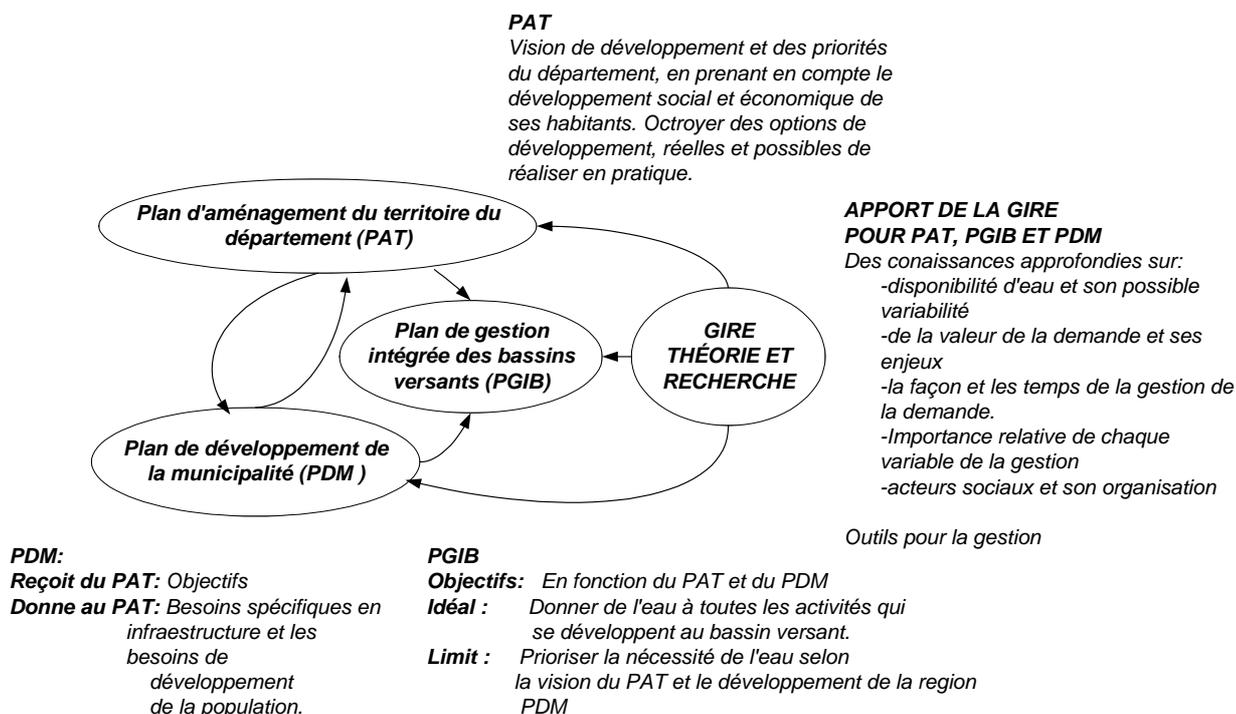
- **Plan de développement de la municipalité. (PDM)**

Ce plan propose la façon dont la municipalité pourrait prospérer en fonction des ressources de son territoire ou en association avec d'autres municipalités. Il devra inclure des mesures concrètes proposées par la municipalité.

- **Plan de gestion intégrée des bassins versants (PGIB) :**

Ce plan offre les modalités de l'utilisation durable des ressources du bassin versant en fonction de ses usagers, principalement ceux de l'eau.

Figure 8.5 : GIRE comme une proposition de construction d'une stratégie de planification de l'eau



La Figure 8.5 montre, notre proposition d'utilisation de la théorie de la GIRE et principalement de la recherche qu'il est possible de faire dans son cadre Il s'agit d'un outil qui peut fournir des connaissances aux instruments de planification boliviens dans les domaines décrits dans la figure et analysés dans cette thèse (voir sous titre 8.2.1).

Sur ce sujet, nous soulignons les aspects suivants :

Les instruments de planification sont déterminés par des institutions étatiques qui, bien qu'agissant à un niveau local, devront tenir compte du concept de planification à plus grande échelle (régionale).

Les instruments de planification devront être coordonnés par les autorités régionales. Elles sont supposées assurer la coordination des instruments de planification régionale et de développement des entités limitrophes.

D'autre part, les instruments de planification nécessitent des connaissances approfondies de la disponibilité des ressources et de leur utilisation durable. L'implication de la recherche est donc nécessaire.

Le rôle des institutions de planification (principalement gouvernementales) et l'impact qu'elles ont dans la gestion de l'eau doivent être clairs. Elles doivent avoir une connaissance approfondie de la disponibilité en eau des bassins versants.

La recherche de nouvelles sources d'eau superficielle engendre une problématique de type social à résoudre. En effet, il ne s'agit pas uniquement d'une problématique de type technique. La planification devra tenir compte de ces deux aspects.

Il est donc clair que la participation sociale pour les décisions relative à l'eau est nécessaire au-delà du fait que la loi bolivienne déclare la participation de la société comme indispensable pour les décisions sur n'importe quelle type de projet.

Planification d'éléments d'infrastructures nécessaires: la possibilité d'exploitation d'une ressource en eau est liée à la capacité de mobilisation de celle-ci et à son efficacité. Une proposition de mise en place d'infrastructure a été présentée à la Figure 8.4. Elle provient de l'analyse de bilan d'offre et demande présentée au début de ce chapitre.

Planification de temps: celle-ci résulte directement du bilan de l'offre et de la demande en eau au niveau du bassin et du bilan entre le volume d'eau nécessaire et la capacité des usines de traitement. (Tableau 8.2, Figure 8.1, Annexe).

Les moments de dépassement de l'offre de ressources en eau ou de la capacité des usines de traitement d'eau, sont des points de repère pour la gestion de l'eau. En effet, au delà de ceux-ci, la planification devra prendre en compte des délais comme les délais de financement, délais administratifs, délai de projet, temps de construction et durée de mise en fonctionnement des infrastructures. La somme de tous ces délais devra être considérée à l'avance des dates qui proviennent des bilans d'offre et demande.

8.2.3 Gestion de la demande

Ce travail de recherche suggère à la fois une réponse et une proposition pour la gestion de la demande. Nous proposons que les connaissances sur l'influence de chaque variable constituent la base de la GIRE. L'ensemble des aspects analysés dans cette thèse permet d'assurer que la demande soit satisfaite, en remarquant les vulnérabilités des systèmes ou les variables qui représentent un risque pour cette gestion.

8.2.4 Autres concepts pour l'application de la GIRE

Reconnaissons que cette étude n'approfondit que le côté urbain de la problématique. Pour prendre des décisions plus complètes, il va falloir soumettre le milieu rural à une analyse similaire afin d'estimer correctement la demande en eau des communautés rurales. On suggère que la méthodologie suivie lors de cette analyse soit semblable celle présentée dans ce travail

Pour établir les bases de la Gestion de l'eau et pour son application ultérieure à notre cas d'étude, nous voudrions ajouter deux critères qui provient aussi de la théorie de la GIRE et qui sont adaptées pour notre cas d'étude: la valorisation de l'eau comme ressource sociale et économique et la valorisation du service environnemental.

Pourquoi attribuer une valeur au service environnemental ?

L'eau disponible des bassins souffre actuellement d'une diminution étant donné, la perte de masse des glaciers présents en son sein. Cette diminution de la taille des glaciers se traduit aussi par une perte de la capacité naturelle de régulation de l'apport en eau au bassin versant,

La disparition des glaciers entraine également la perte de la capacité d'humectage du bassin préparant la surface du sol pour l'écoulement.

Si nous considérons la capacité naturelle de régulation d'eau et l'apport des glaciers comme un service environnemental du bassin versant, nous pouvons dire que ce service diminue.

Comme le niveau de service environnemental du bassin diminue, le processus de conversion d'une goutte d'eau entrant dans le bassin (précipitations, apport glaciaire, input du bassin) en une goutte d'eau utilisable (output du bassin : eau douce), se complique. Si nous attribuons une valeur à ce processus de conversion, nous pourrions dire qu'actuellement l'obtention d'une goutte d'eau douce « coûte plus cher » d'un point de vue environnemental qu'il y a quelques années.

Cette situation se traduit d'un point de vue technique par une diminution de la valeur du coefficient d'écoulement (Cesc).

Pourquoi attribuer une valeur à l'eau comme ressource sociale et économique ?

Il s'avère tout d'abord nécessaire de souligner que ce concept d'attribution de valeur ne signifie pas d'attribuer une valeur en argent à l'eau dans le but éventuel de récupérer les coûts de traitement, de service ou d'investissement. On explique ci-dessous le bien-fondé d'un tel concept à travers l'analyse de la problématique.

On a reconnu qu'actuellement la demande en eau du système d'El Alto et les apports de sa source Tuni sont pratiquement équivalents. On a également reconnu qu'il reste un volume moyen par année d'à peu près de 2 hm³, volume qui pourrait potentiellement être utilisé, mais qui dans les faits constitue une réserve d'eau dans le lac de barrage pour les années sèches.

D'autre part, on observe un souhait des communautés rurales implantées au sein du bassin de pouvoir disposer de ces ressources en eau pour permettre le développement de leur région.

Or, si nous estimons que ces 2 hm³ d'eau sont disponibles pour être utilisés (ce qui est bien évidemment discutable), la valeur attribuée à ce volume d'eau est importante vu la rareté du bien en regard de la demande provenant de deux régions : (El Alto et les communautés de Pucarani).

Ce volume de 2 hm³ d'eau possède dès lors une valeur plus grande, que le même volume d'eau présent dans une autre partie du pays où les ressources en eau sont abondantes. La rareté de la ressource et son intérêt stratégique la rendent plus précieuse.

À travers cette analyse nous pouvons donc conclure que cette zone d'étude est une zone où la valeur de la ressource en eau est probablement l'une des plus élevées de toute la Bolivie. Voilà le sens qu'il convient d'attribuer au concept de « valeur » de la ressource en eau.

8.3 Conclusions

Bilan de l'offre et de la demande en eau

Le bilan de l'offre et de la demande en eau est le résultat des recherches et des analyses effectuées dans les 7 premiers chapitres de cette recherche.

Il met en relation tous les aspects et variables analysés, ce qui nous permet d'émettre quatre conclusions principales :

- Vulnérabilité actuelle des systèmes :
 - El Alto est un système vulnérable nécessitant des solutions immédiates.
 - Pas de vulnérabilité particulière des autres systèmes
- « Temps de la gestion » (*dates clés de la gestion*)
 - Les années 2010 -2012 s'annoncent décisives pour la planification de la gestion d'El Alto puisque c'est pendant cette période que sa vulnérabilité se manifestera. La demande surpassera l'offre des ressources des bassins sources d'El Alto ainsi que la capacité de traitement de son usine de traitement de l'eau.
 - L'offre pourra satisfaire la demande à Achachicala lorsque les glaciers auront disparu.
 - Á Pampahasi, situation similaire à cause des variables démographiques. (Population et CJE).
- Importance de l'influence des variables sur la gestion de l'eau à El Alto
 Nous classifions les variables selon l'importance de leur influence sur le bilan d'offre et de demande de la façon suivante:
 1. Pertes dans le processus de traitement d'eau (des les barrages jusqu'au réseau)
 2. Influence démographique sur consommation d'eau (Augmentation de la population ou de la CJE).
 3. Recul des glaciers
 4. Diminution des précipitations (scénario climatique)

Nous considérons que la détermination de l'importance de l'influence relative des variables de l'eau sur le bilan d'offre et de demande est un apport important pour la gestion de l'eau de cette ville dû au fait que la planification des solutions pour diminuer sa vulnérabilité et son éventuel déficit en eau pourrait être élaborée en fonction de cette classification.

- Le mode de la gestion

Nous proposons l'aménagement d'infrastructures afin que les systèmes de La Paz et El Alto soient plus solidaires entre eux (Figure 8.4).

Cet aménagement ainsi que les conclusions sur (a) les temps de la gestion, (b) l'analyse des ses variables principales et (c) ce qui ressort des analyses de cette thèse constitueraient les bases pour la planification de la gestion de l'eau.

La prise de décisions stratégiques en fonction de ces trois conclusions déterminera le mode de la gestion de l'eau et de sa planification

Cet ensemble devient alors notre proposition de base pour la GIRE ou modalité de la gestion de l'eau pour les villes de La Paz et El Alto.

Bases de la GIRE

Nous considérons que notre apport principal à la GIRE constitue l'ensemble des connaissances, analyses et outils que nous avons élaborés dans cette thèse. Cet apport permettra la planification de l'utilisation durable de l'eau pour les villes de LP et EA soit dans les cas les plus vulnérables comme celui d'El Alto ou soit dans les cas plus simples comme ceux des deux autres systèmes.

Une meilleure connaissance des variables qui jouent un rôle dans la gestion de l'eau permet que les décisions stratégiques se basent sur des connaissances solides. Par conséquent, les décisions prises pour la gestion des eaux seront probablement meilleures.

La connaissance du temps dont nous disposons pour la gestion de l'eau (bilan d'offre et de demande), nous permet aussi de prioriser les décisions dans les cas les plus vulnérables et d'agir sur les variables primordiales que nous avons identifiées.

Signalons que les connaissances acquises sont aussi applicables pour la résolution de conflits et pour leur prévention.

Les connaissances exposées dans cette thèse ainsi que les aspects susmentionnés nous conduisent vers une meilleure gestion de l'eau. Il s'agit d'un des objectifs principaux de la GIRE. Notre contribution consiste à promouvoir une gouvernance de l'eau favorable aux villes de La Paz et d'El Alto.